

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS
DE RAMAS EN VERDE DE HAYA (*FAGUS SYLVATICA* L.)
PROCEDENTES DEL HAYEDO DE MONTEJO DE LA SIERRA DE
MADRID.**

Autor:

VºBº del Director:

Fdo. Marta Fernández Plana

Fdo. Miguel Esteban Herrero

Septiembre 2015

**“© UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, AÑO 2015,
TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS”**



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS
DE RAMAS EN VERDE DE HAYA (*FAGUS SYLVATICA* L.)
PROCEDENTES DEL HAYEDO DE MONTEJO DE LA SIERRA DE
MADRID.**

Autor: Marta Fernández Plana.

Director: Miguel Esteban Herrero.

Tribunal:

PRESIDENTE

VOCAL

SECRETARIO

Fdo.

Fdo.

Fdo.

CALIFICACIÓN:

Fecha: Madrid, a de de

OBSERVACIONES:



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DE RAMAS EN VERDE DE HAYA (*FAGUS SYLVATICA* L.) PROCEDENTES DEL HAYEDO DE MONTEJO DE LA SIERRA DE MADRID.

Autor: Marta Fernández Plana.

Director: Miguel Esteban Herrero.

Departamento: Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental

RESUMEN.

El presente proyecto es un estudio sobre las propiedades físicas y mecánicas de un conjunto de muestras de ramas de *Fagus sylvatica* L. recogidas en el Hayedo de Montejo de la Sierra, en Madrid.

El Hayedo de Montejo hoy en día es muy conocido en Madrid, como también a nivel nacional e internacional. El hayedo alberga cientos de hayas entre las que se encuentran algunas hayas centenarias y singulares, lo que no es habitual en latitudes tan meridionales con las de la provincia de Madrid. Sin embargo, en las últimas décadas las hayas han sufrido un decaimiento en su estado provocándose en ellas roturas e incluso la muerte. Por ello se han llevado y se están llevando a cabo numerosos estudios que permitan analizar la situación para mantener y mejorar el estado de conservación del hayedo.

En este trabajo se han recogido una muestra de 17 ramas sanas y representativas del hayedo. De estas ramas se han obtenido sus dimensiones, se han descrito visualmente identificando sus particularidades y defectos. Se han clasificado en dos grupos, según diámetro y longitud de las ramas.

Se han realizado ensayos no destructivos (NDT) para obtener variables de medición y sus relaciones con las propiedades físicas y mecánicas. Se han realizado mediciones con penetrómetro (Pilodyn) para obtener su relación con la densidad de las ramas. Se han realizado mediciones de velocidad de propagación de una onda (Microsecond Timer) para obtener el módulo de elasticidad dinámico con el que estimar el módulo de elasticidad y la resistencia.

Se ha realizado un ensayo a flexión para obtener el módulo de elasticidad (MOE) y resistencia (MOR). Entre los resultados se puede destacar que las ramas más gruesas tienen un MOE a flexión y MOR más bajo y un MOE dinámico más alto que las ramas más delgadas.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Determination of the physical-mechanical properties of beech (*Fagus sylvatica* L.) green branches from Hayedo de Montejo de la Sierra in Madrid.

Autor: Marta Fernández Plana.

Director: Miguel Esteban Herrero.

Department: Forest and Environmental Engineering and Management

ABSTRACT.

The aim of this Project is to describe the physical-mechanical properties of *Fagus sylvatica*'s green branches from Hayedo de Montejo de la Sierra.

Nowadays, the Hayedo de Montejo is well known in Madrid but is also known at national and international level. The main reason is because there, is possible to find hundreds of beeches which some of them are hundred-year- old trees. This type of forest is not normal to find in these southern areas as Madrid. Nevertheless, in the last decades a several of beeches have being suffered a deterioration, which has produced the felling and breaking of hundred-year-old beeches. Therefore, a large number of research have been carried out in the past and in the present in this area in order to improve and to keep up the Hayedo de Montejo.

For this project, it has been collected a total of 17 representative and healthy sample of beech's branches. Once that the branches were taken to the laboratory, all of them have been visually described, they have also been measured their physical dimensions in which it has been identified their faults and peculiarities. Finally, they were classified into two groups in order to their diameter and lenght.

The former, the nondestructive testing (NDT) have been done to get measurement variables to relate them to physical properties of beeches from The Hayedo de Montejo. Futhermore, measures with the penetrometer have been done to get its relationship with the density of the branches. Finally, the waves propagation speed have been measured to get the dynamic modulus of elasticity to estimate the modulus of elasticity and the resistance.

The latter, the destructive testing (bending test) has been done to get the modulus of elasticity (MOE) and modulus of ruptura (MOR). Some results achieved were that branches with the biggest diameters have a MOE in flexion and a MOR lower than the thinnest ones, but they have a dynamic MOE higher than the thinnest ones.



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	OBJETIVOS	9
3.	ANTECEDENTES.....	10
3.1	Localización.....	10
3.2	La especie.....	11
3.3	Importancia del Hayedo de Montejo.....	12
3.4	Madera	14
3.5	Albura y duramen	15
3.6	Madera de reacción	16
3.7	Propiedades mecánicas de la madera.....	16
3.8	Propiedades físicas de la madera	17
3.8.1	La anisotropía	18
3.8.2	La densidad	18
3.8.3	El contenido de humedad.....	18
3.8.4	La higroscopicidad.....	19
3.8.5	Contracción volumétrica.....	20
3.9	Biomecánica del árbol.....	20
3.9.1	Límite elástico	21
3.10	Cargas que actúan sobre el árbol	22
3.10.1	El viento.....	22
3.10.2	Defectos en la madera de los árboles en pie	23
3.11	Ensayos no destructivos en la madera (NDT).....	25
3.12	Ensayos a flexión en ramas de árboles	26
3.12.1	Diámetro-longitud de la rama:	28
3.12.2	longitud-peso	28
4.	METODOLOGÍA	29
4.1	Medios y equipos utilizados.....	29
4.2	Xilohigrometro.....	29
4.3	Balanza digital	30
4.4	Penetrómetro portátil	31
4.5	Microsecond Timer (MST)	32



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

4.6	Máquina universal con célula de carga de 60kN	33
4.7	Material auxiliar.....	35
4.8	Material de ensayo	38
4.9	Desarrollo experimental.....	39
4.10	Dimensiones y clasificación	39
4.11	Ensayos no destructivos	41
4.12	Determinación del contenido de humedad, xilohigrómetro.....	41
4.13	Profundidad de penetración de una varilla, Pilodyn	42
4.14	Velocidad de propagación de onda acústica, Microsecond Timer	43
4.15	Determinación de la densidad.....	44
4.16	Ensayos mecánicos a flexión: MOE y MOR	45
4.16.1	Cálculo del módulo de elasticidad (MOE)	48
4.16.2	Cálculo del módulo de rotura (MOR).....	50
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
5.1	Evaluación visual de las muestras escogidas	52
5.2	Determinación de la densidad.....	55
5.3	Determinación de la humedad	57
5.4	Determinación de la profundidad de penetración con una varilla	59
5.5	Calculo del módulo de elasticidad dinámico (MOEdin).....	61
5.6	Calculo del módulo de elasticidad estático (MOE)	64
5.7	Cálculo de la resistencia (MOR).....	66
5.8	Relación entre diámetro y longitud en la rama	69
5.9	Relación entre densidad y penetración con pilodyn	74
5.10	Relación entre MOE dinámico y MOE estático	76
5.11	Relación entre MOE dinámico y velocidad de onda	78
5.12	Relación entre el MOR y la velocidad de propagación de la onda.	81
5.13	Relación entre MOR vs MOE dinámico.	83
6.	CONCLUSIONES	85
7.	BIBLIOGRAFÍA	87
8.	ANEXO I: RESUMEN DEL PLAN DE TRABAJO.....	89
9.	ANEXO II: PRESUPUESTO DEL PROYECTO	92
10.	ANEXO III: INFORME EJECUTIVO	94
10.1	Descripción del proyecto.	94
10.2	Valores del Proyecto	95
10.3	Requisitos de financiación	96



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

10.4	Aspectos críticos proyecto	96
11.	ANEXO IV: TABLAS DE ESTUDIOS PREVIOS AL PROYECTO.	97
12.	ANEXO V: TABLAS DE MEDICIONES DE LAS RAMAS	100
13.	ANEXO VI: IMÁGENES FOTOGRÁFICAS.....	142



1. INTRODUCCIÓN

Este Proyecto de Fin de Grado se enmarca en el estudio biomecánico de las hayas (*Fagus sylvatica* L.) del Hayedo de Montejo de la Sierra (Madrid), y forma parte de un proyecto de investigación financiado por la convocatoria 2014 de Medio Ambiente de la Fundación Obra Social y Monte de Piedad de Madrid, y dirigido por el Profesor y Catedrático D. Luis Gil Sánchez.

El Hayedo de Montejo se encuentra en la provincia de Madrid y es muy conocido popularmente, en él, alberga cientos de hayas, algunas centenarias y singulares. No es frecuente encontrar estas formaciones en latitudes tan meridionales. Sin embargo, su localización resguardada en una ladera de sombra que acumula humedad de las masas de aire que chocan contra la Sierra, y el paso del río Jarama a sus pies, hacen que el Hayedo de Montejo sea uno de los más meridionales de Europa.

Según información facilitada por el Grupo de Investigación, en el Hayedo se ha detectado en los últimos años una decrepitud e incremento de caídas de árboles o ramas por causas diversas, afectando especialmente a las hayas centenarias de mayor valor.

Puesto que estas hayas centenarias son de gran valor ecológico, se iniciaron hace años algunos estudios encaminados al análisis del estado del hayedo y de las causas que han llevado a las hayas a la situación actual. Se han llevado a cabo estudios de las condiciones climáticas, condiciones fisiográficas, espaciamiento medio entre hayas centenarias, presencia de plagas, etc. Entre otras actuaciones, el presente estudio pretende analizar las propiedades físicas y mecánicas de los árboles mediante el estudio de ramas verdes y sanas. Se espera continuar este estudio con otros trabajos para la modelización y el análisis de árboles enteros en pie.

Para este trabajo se han recogido muestras representativas de ramas sanas y verdes para su estudio en laboratorio. Se han determinado propiedades físicas y mecánicas mediante ensayos (densidad, módulo de elasticidad MOE y resistencia MOR). Adicionalmente se han realizado mediciones mediante técnicas no destructivas (penetrómetro y propagación de ondas) para estudiar su relación con las propiedades físicas y mecánicas.



2. OBJETIVOS

El objeto de este Proyecto Fin de Grado es iniciar el estudio biomecánico de los árboles singulares de la especie *Fagus sylvatica* L. presentes en el Hayedo de Montejo de la Sierra, Madrid. Se puede considerar el árbol como un elemento estructural, es decir como una viga en voladizo empotrada en el suelo, para soportar las cargas debidas a la nieve, el viento o el peso propio. Para poder desarrollar realizar este estudio es necesario conocer las propiedades físicas y mecánicas de la madera de haya en los árboles vivos.

Para ello se llevaran a cabo ensayos en un conjunto de ramas seleccionadas para obtener propiedades físicas y mecánicas. Se pretende que los resultados obtenidos puedan ser extrapolados a los fustes enteros.

El objeto general del estudio es obtener propiedades físicas y mecánicas de las ramas verdes de haya, obtenidas del Hayedo de Montejo de la Sierra, y obtener estimadores no destructivos.

En primer lugar se hará una descripción visual de las ramas recogidas en campo, donde se observaran defectos como la curvatura de las ramas, grietas, protuberancias, etc.

En segundo lugar se realizarán los siguientes ensayos no destructivos:

- Para conocer el contenido de humedad presente en cada rama se ha utilizado un xilohigrómetro de resistencia, Hydromette HT 85T.
- Se ha medido la resistencia de las ramas a ser penetradas por una varilla metálica a partir de ensayos con un Pilodyn modelo 6J Forest. Esta medida permite conocer el estado sanitario de la rama y estimar su densidad.
- Se ha medido el tiempo de propagación de una onda que recorre la rama con Microsecond Timer. La velocidad de propagación de la onda, junto con la densidad, permite obtener el módulo de elasticidad dinámico.

En tercer lugar se realizará un ensayo a flexión de las ramas siguiendo un método basado en la norma UNE-EN 408 y adaptado a las características singulares de este estudio. Con ello se pretende obtener el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión.

3. ANTECEDENTES

3.1 Localización

El Hayedo de Montejo de la Sierra, también conocido como “monte El Chaparral” se encuentra localizado en el municipio de Montejo de la Sierra, al noreste de la provincia de Madrid, en el alto del valle del Jarama, en el término municipal Montejo de la Sierra. Además forma parte de la Sierra del Rincón, conocida también como Sierra Pobre.

Está situado en una umbría y ladera que comienza en la margen derecha del río Jarama, pocos kilómetros aguas abajo de su nacimiento. Lo componen dos montes de propiedad vecinal, El Chaparral y la Solana, que suman las 250 hectáreas protegidas, aunque sólo en las 122 hectáreas del primero pueden encontrarse manchas de hayedo puro.

Está situado entre los 1.300 y 1.550 metros de altitud en las faldas de la Sierra de Ayllón. Cuenta con pendientes muy variables, desde la parte más alta del bosque con un terreno prácticamente llano hasta otras zonas con gran pendiente donde apenas se puede caminar.

En él albergan grandes extensiones de encinares, robledales y la especie más protagonistas: el haya.



Imagen 1: Localización del Hayedo de Montejo (Fuente El Hayedo de Montejo (1992-2009):17 años de investigaciones para su conservación).

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

3.2 La especie

El Hayedo de Montejo, como su propio nombre indica es un bosque de hayas (*Fagus sylvatica* L.) como especie predominante. No obstante, en él se encuentran otras especies como robles (*Quercus pétrea* Liebl) y melojos (*Quercus pirenaica* Willd), acebos (*Ilex aquifolium* L.), tejos (*Taxus baccata* L.), serbales (*Sorbus aucuparia* L.), mostajos (*Sorbus aria* (L.) Crantz), fresnos (*Fraxinus* sp), arces (*Acer* sp), sauces (*Salix* sp), abedules (*Bétula* sp), cerezos (*Prunus padus* L.), álamos temblones (*Populus tremula* L.) o manzanos (*Malus domestica* Borkh).

El haya es una especie caducifolia perteneciente a la familia *Fagaceae*, orden Fagales.

Se encuentra principalmente en el norte de la Península Ibérica en laderas montañosas. Mientras que en el centro y oeste de Europa es un árbol de llanura.

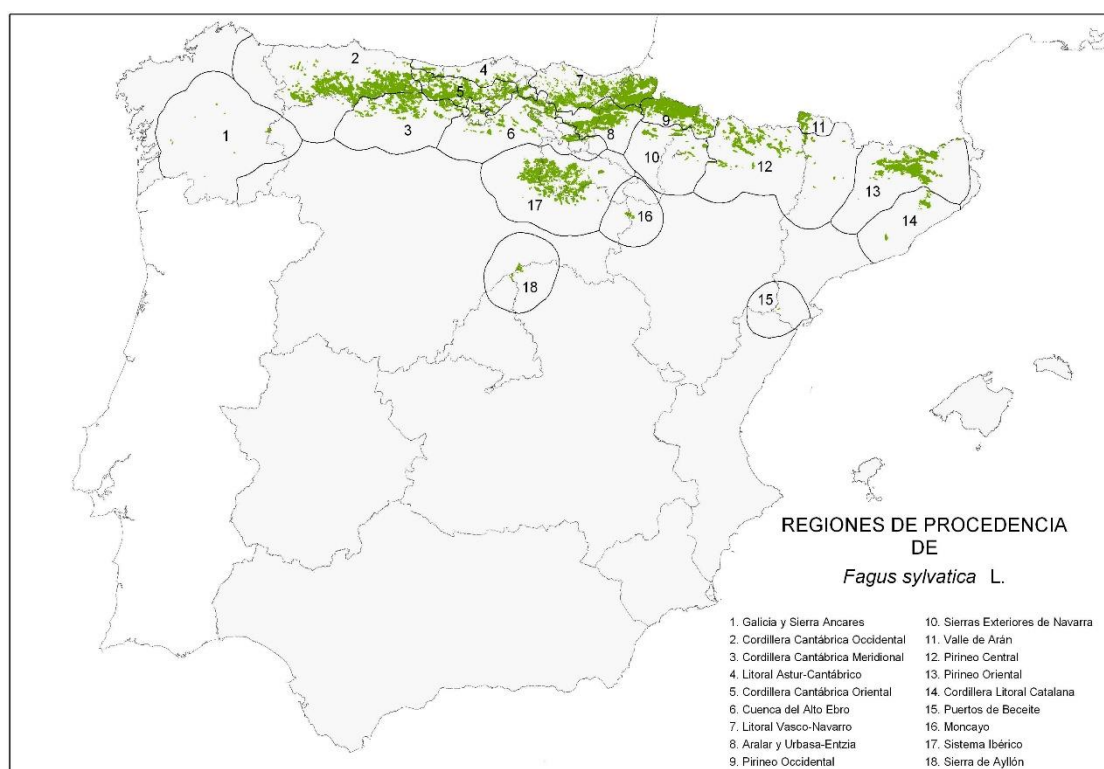


Imagen 2: Distribución *Fagus sylvatica* L. en España (MAGRAMA).



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Se localiza en lugares con precipitaciones superiores a los 1.000 milímetros (150 mm en verano) y en altitudes entre los 50-1.900 metros.

En ejemplares aislados, se caracteriza por poseer una copa redondeada, muy abierta y con ramas gruesas en disposición más o menos horizontal. Suele ocupar 2/3 de su altura.

En general y en especial en el Hayedo de Montejo, las hayas poseen un aspecto muy robusto con diámetro que pueden alcanzar los 1,3 metros en hayas centenarias.

El sistema radical lo tienen muy desarrollado y profundiza poco, donde las raíces secundarias crean una maraña de raicillas superficiales que reciclan los nutrientes de la hojarasca que queda en la superficie del suelo absorbiendo además el agua.

El sistema foliar, se caracteriza por poseer hojas simples, elípticas de contorno ondulado, verde claro cuando están en el árbol y con los nervios secundarios muy paralelos. Al nacer las hojas nacen cubiertas de pelos sedosos, que van perdiendo al madurar. Su disposición es horizontal, lo que las permite una mayor captación de la luz (Gómez, F. et al. 2010).

Su floración y foliación son coetáneas, afinales de abril o principios de mayo.

Su fruto es trígono cubierto por una cúpula leñosa con escamas espiniscentes que se abren en cuatro valvas. Su fruto es llamado hayuco. Además es una especie vecera, cada 4 ó 5 años produce el fruto entre los 50 y los 120 años de edad (Gómez, F. et al. 2010).

Es una especie muy competitiva, que suele formar bosques monoespecíficos.

3.3 Importancia del Hayedo de Montejo

El Hayedo de Montejo de la Sierra, también conocido como “monte El Chaparral” de propiedad vecinal, es un monte de gran interés cultural porque alberga más de trescientas hayas centenarias, algunas de ellas de gran voluminosidad. Dichas hayas están acompañadas en pequeña proporción por especies arbóreas ya comentadas, como el rebollo (*Quercus pirenaica* Willd), acebo (*Ilex aquifolium* L.), roble (*Quercus pétrea* Liebl), avellano (*Corylus avellana* L.) y abedul (*Betula alba* L.) entre otros.

Por su cercanía a Madrid, el incremento del turismo, la singularidad de las especies y la belleza de su paisaje, el Hayedo de Montejo fue declarado Sitio Natural de Interés



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Nacional en 1974, incluyendo también al monte La Solana, formando una superficie protegida de 250 hectáreas. Además se encuentra a su vez dentro del Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) del Alto Lozoya.

En 1988 en colaboración de la Comunidad de Madrid y el Ayuntamiento de Montejo de la Sierra, se decide regular la entrada al Hayedo, acondicionando además los itinerarios que actualmente son guiados en el interior del monte. Esto surge como una iniciativa del concepto de gestión enfocada a la conservación.

En junio de 2005 la Sierra del Rincón fue declarada Reserva de la Biosfera por parte de la UNESCO por su belleza y por la singularidad especial de poseer un bosque de hayas centenarias en una situación geográfica tan meridional en Europa.

Las especies que más han prosperado en los últimos años son el haya y el acebo. Esto parece lógico debido a que son especies de bosques de umbría, que en bosques densos como el Hayedo de Montejo, encuentran las propiedades óptimas para su desarrollo.

Un problema que ha surgido es que cada vez hay menos pies de mayor clase diamétrica, cuando por naturaleza tendrían que prosperar y vivir más años. Las cuatro especies que más abundan en el bosque (haya, melojo, acebo y roble) tienen más de 100 pies pequeños/ha, incluso el haya alcanza los 200 pies pequeños/ha. Mientras que en la segunda clase de edad el melojo es el único que supera los 50 pies/ha, destacando el haya como la especie que mayor reducción ha alcanzado. Haciendo hincapié en las hayas centenarias que en los últimos años ha incrementado el número de derribos y fracturas.

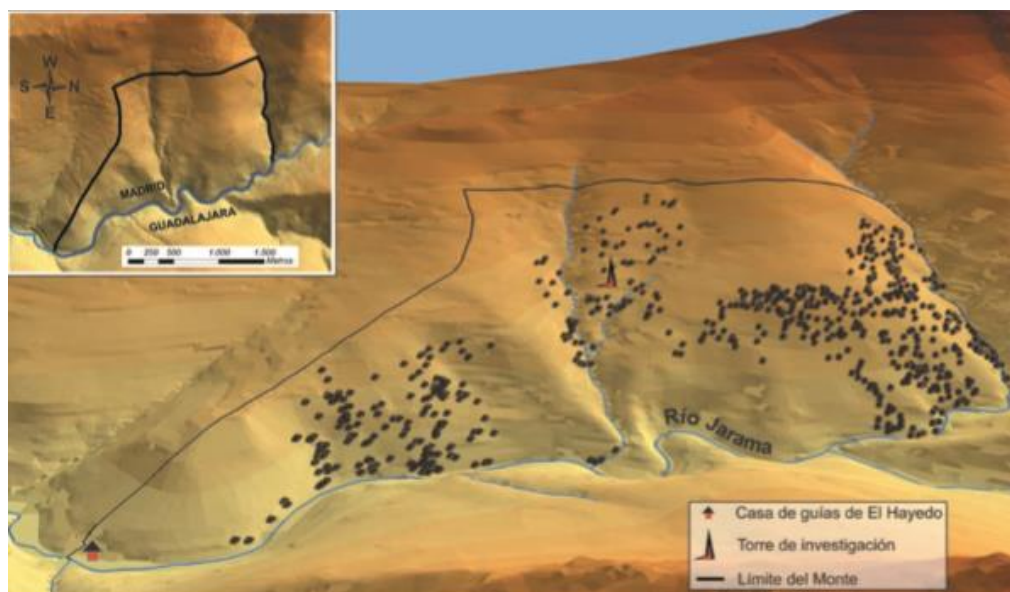


Imagen 3: Representación en 3 dimensiones de la distribución espacial de las hayas centenarias en El Hayedo de Montejo. (Fuente El Hayedo de Montejo (1992-2009):17 años de investigaciones para su conservación).

3.4 Madera

La madera es un material orgánico y natural exclusivo de los vegetales leñosos, formado a partir del xilema secundario. La madera constituye los fustes, ramas y raíces de los vegetales leñosos (se excluye la corteza).

Una de las formas de clasificar la madera es en madera de conífera y madera de frondosas.

La madera de conífera se caracteriza porque es muy homogénea debido a la reducida diversidad y especialización sus células. Además la falta de fibras libriformes hace que esta madera sea conocida también como madera blanda. La madera de frondosas se caracteriza por una mayor heterogeneidad de las células. Este proyecto se centra en la madera de frondosas, al tratarse de la especie *Fagus sylvatica* L.

En la estructura de la madera se identifican tres planos. El transversal, perpendicular al eje del árbol. El radial, el corte es paralelo al eje del árbol pasando por el centro de este. El tangencial, el corte también es paralelo al eje del árbol pero no pasa por el centro de él.

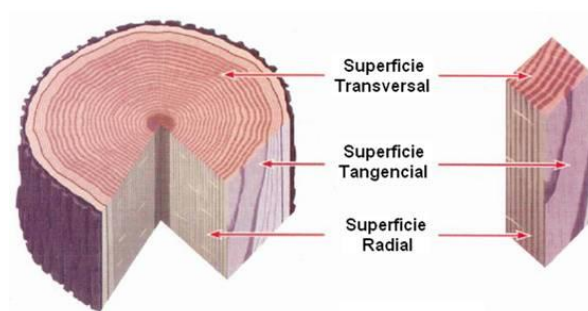


Imagen 4: Los planos de la madera (García, L. et al. 2003)

3.5 Albura y duramen

El xilema secundario conforma la madera de los fustes y de las ramas de los árboles. Una vez que éste ha alcanzado una edad, reflejada en la altura del árbol, se diferenciarán el duramen y la albura. El duramen está localizado en la parte central de la sección transversal, caracterizado por ser madera que ha perdido su carácter conductor y desempeñando la función de sostén del pie. Esto ocurre debido a que las células del parénquima han perdido el protoplasto y dejan de ser funcionales. La albura, localizada en la parte externa de la sección transversal, se caracteriza por su función conductora, mecánica y almacén de reservas (Gil, L. 2010).

El paso de albura a duramen se produce primero mediante un proceso físico o mecánico y segundo mediante un proceso químico, a partir de los cuales las células de la albura morirán. El proceso físico o mecánico, sufrido por todas las maderas en la sección transversal en mayor o menor medida, se caracteriza porque en las frondosas aparecen los thylls, expansiones vesiculares procedentes de las células de parénquima, que penetran en los vasos, taponando el elemento axial de conducción de la savia. El proceso químico, en coníferas, caracterizado porque el duramen tiene más resina y aceite que penetran por los intersticios de la pared celular, que en su interior contiene sustancias solubles como hidratos de carbono, polisacáridos alcaloides, etc. que al oxidarse producen ese color más oscuro en la madera. En el caso de las frondosas es similar aunque con algunas complicaciones más (García, L. et al. 2003).

3.6 Madera de reacción

La madera de reacción se forma cuando el tronco principal se desplaza de su posición normal de crecimiento, alejado de su verticalidad por la acción del viento, pendientes elevadas, etc. El cambium realiza un incremento parcial de su actividad que afecta sólo a una parte de su perímetro, llamándose esta zona, la madera de reacción. Esta madera provoca una excentricidad de los tallos y ramas y altera en las propiedades mecánicas.

En angiospermas, dicha madera se forma en la cara superior del eje, y se conoce como madera de tracción. Su estructura carece de homogeneidad. La madera no tiene espacios intercelulares y además los vasos no son tan abundantes y son más pequeños que en las gimnospermas.

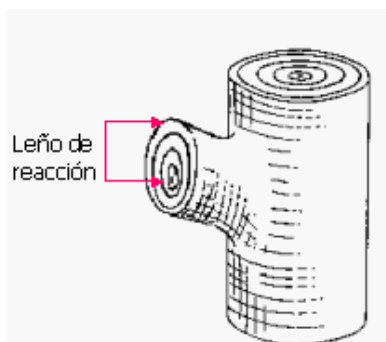


Imagen 5: Madera de reacción, de tracción en angiospermas. (Gil, L., 2010)

3.7 Propiedades mecánicas de la madera

Algunos autores describen el comportamiento mecánico de la madera más próximo a la viscosidad que a la elasticidad lineal (Wainwright et al, 1976), aunque en la práctica la mayor parte de las veces se le considera elástico lineal. En este contexto se habla normalmente del módulo de elasticidad (MOE) y de la resistencia (MOR) como de las propiedades mecánicas más representativas.

Como material natural, hay una gran variación de las propiedades mecánicas entre unas especies y otras, como además dentro de la misma especie, ya que aparecen diferentes defectos y anomalías que van caracterizando a cada individuo. La capacidad de carga o la resistencia de un elemento de madera normalmente viene determinada por las



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

irregularidades o singularidades, principalmente los nudos, que producen desviaciones locales de la fibra.

En las propiedades mecánicas de la madera normalmente se habla de las direcciones perpendicular y paralela a las fibras, unificando en la dirección perpendicular las direcciones radial y tangencial.

En el caso de la madera de árboles, Coder, K.D.(2010) estableció que fustes macizos resistirían menos que fustes huecos pero con un grosor que tuviese la misma cantidad de madera que el fuste sólido. Con esto se explica que la geometría de los materiales de misma masa influye en la resistencia a la curvatura y a la torsión. Esto puede ser aplicable a árboles que estén medio moribundos en pie donde el duramen ya no esté cumpliendo su función mecánica de forma normal.

En el presente proyecto se estudian ramas consideradas como vigas en voladizo empotradas en el tronco, y que soportan su propia carga y las cargas externas como el viento o la nieve. Así, un aumento en longitud de la rama conduce a un aumento de su peso y de los esfuerzos debidos a las cargas externas. La distribución de las cargas en la rama afecta de forma considerable a la flexión y al momento máximo de curvatura (Patrick, C., Mortier, P. 1991)

Es importante considerar en la rama la forma de su ápice terminal ya que influye en su comportamiento mecánico (Schaeffer, 1991).

3.8 Propiedades físicas de la madera

Las propiedades físicas de la madera determinan el comportamiento de esta frente a agentes externos del medio natural. Entre las propiedades físicas más representativas de la madera se citan la anisotropía, la densidad, el contenido de humedad, la higroscopicidad y la inestabilidad dimensional.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

3.8.1 La anisotropía

La anisotropía en la madera se define como la heterogeneidad del material, debido a que está formado por tejidos que realizan diferentes funciones y que presenta diferentes propiedades físicas y mecánicas según el plano que se considere.

Normalmente, cuando se habla de propiedades físicas se hace referencia a los tres planos transversal, tangencial y radial, y cuando se habla de las propiedades mecánicas sólo se simplifica al plano perpendicular a las fibras y el plano paralelo a las fibras.

3.8.2 La densidad

La densidad se define como el cociente entre la masa y el volumen de la madera. La densidad varía con la humedad que presente la madera, es decir, al aumentar la humedad aumenta la densidad.

La densidad real de la madera (sin tener en cuenta los huecos del lumen celular) es aproximadamente la misma para todas las especies 1.560 kg/m^3 . Sin embargo, la densidad aparente es diferente de unas especies a otras, dentro de la misma especie e incluso dentro la misma pieza, dependiendo del contenido de humedad y de la localización.

Las maderas se clasifican por su densidad aparente en:

- Pesadas, si es mayor de 800 kg/m^3 .
- Ligeras, si está comprendida entre 500 y 700 kg/m^3 .
- Muy ligeras, las menores de 500 kg/m^3 .

3.8.3 El contenido de humedad

Según Pérez (1983) y Cuevas (2003), se entiende por contenido de humedad, la masa de agua contenida en una pieza de madera, expresada como porcentaje de la masa de la probeta anhidra.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

El contenido de humedad de la madera afecta a las propiedades mecánicas y físicas en general. Desde el estado anhidro (contenido de humedad 0%) hasta el punto de saturación de la fibra (PSF, contenido de humedad 30%) las propiedades mecánicas en general disminuyen. A partir del PSF (30 %) y para contenidos de humedad superiores las propiedades mecánicas se mantienen prácticamente constantes.

Según Cuevas (2003), el contenido de humedad de la madera se calcula con la siguiente expresión :

$$C.H. (\%) = \frac{P_i - P_o}{P_o} \times 100$$

Donde:

C.H. Contenido de humedad en porcentaje (%).

Pi Peso inicial de la probeta en gramos.

Po Peso anhidro en gramos (el peso anhidro es el peso que se obtiene cuando se coloca la madera en una estufa a 100 o 102° C, hasta que se obtiene un peso constante).

3.8.4 La higroscopicidad

La higroscopicidad se define como la variación del contenido de humedad de la madera para adaptarse a las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa del aire.

Una de las consecuencias de la higroscopicidad es la variación del peso específico de la madera frente a los cambios del contenido de humedad. Además, la higroscopicidad y los cambios de humedad son los responsables de la hinchazón y la contracción.

La higroscopicidad se puede cuantificar en términos de la variación del peso específico de la madera cuando su contenido de humedad varía en un punto porcentual a partir de la siguiente expresión:

$$h = \frac{(1 - v) \cdot \rho_{12}}{100}$$



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Dónde:

- h Higroscopicidad en kg/m^3 .
- v Coeficiente de contracción volumétrica en porcentaje, determinado según la norma UNE 56.533.77
- ρ_{12} Peso específico en kg/m^3 al 12% de humedad.

3.8.5 Contracción volumétrica

Entre otros coeficientes, la contracción volumétrica permite cuantificar la estabilidad dimensional de la madera frente a cambios del contenido de humedad. Se define como la disminución o pérdida de volumen en la madera como consecuencia de los cambios en el contenido de humedad. Se manifiesta con contenidos de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra y se expresa como porcentaje de la dimensión del volumen la madera en estado verde por cada grado porcentual de humedad.

3.9 Biomecánica del árbol

Para el estudio biomecánico del haya en pie se va a partir de la hipótesis de considerar el árbol como un voladizo empotrado, es decir con un extremo libre y otro totalmente fijo, aunque en la realidad no sea del todo correcto.

Una forma de estimar la resistencia del árbol según Coder, K.D (2000) es a partir del sumatorio de una serie de factores, que se muestran a continuación:

- 1) Los árboles tienden a fracturarse por aquellas zonas donde están más débiles.
- 2) Son árboles más débiles aquellos que crecen enfermos, con alguna herida y que posean una parte deteriorada que va remplazando a la madera estructural.
- 3) El crecimiento en diámetro de las capas exteriores asume la mayor parte de las cargas del árbol.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

- 4) Para cualquier punto del árbol, el área que ocupa la cantidad del material, se aproxima a la resistencia que tiene el árbol en ese punto.

Además en 2010, Coder K.D. contempló en uno de los estudios que llevó a cabo sobre el crecimiento en diámetro de los fustes que la resistencia del tallo se incrementaba en una proporción del diámetro elevado a la cuarta. Además, otro resultado analizado es que pies grandes necesitan incrementos pequeños de diámetro para reaccionar a cambios estructurales y de soporte. Sin embargo, pies menores tienen que crecer rápidamente en diámetro para aguantar su porte frente a cargas externas como por ejemplo la del viento. (Ver Anexo IV, tabla 1).

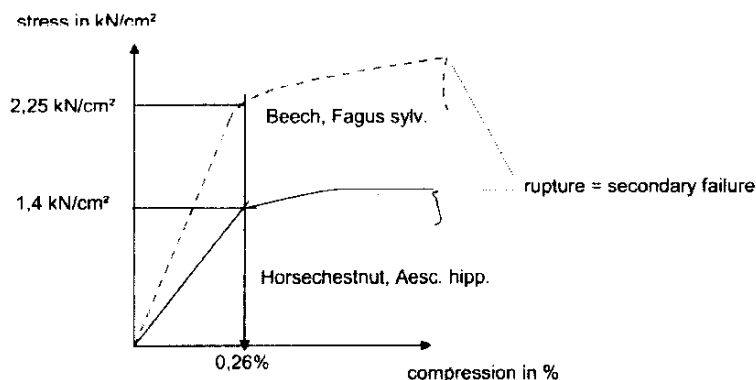
3.9.1 Límite elástico

En el estudio del límite elástico y otras propiedades mecánicas de la madera hay que tener en cuenta que la madera es un material anisótropo, en la que cada eje (axial, radial y tangencial) presenta unas propiedades distintas.

El límite elástico es la máxima tensión que un material puede soportar para después volver a su forma original. Según la ley de Hooke, la tensión creada en un material elástico es proporcional al esfuerzo, dentro del límite de elasticidad (Parker, 1961).

La madera, como cualquier otro material, tiene un límite elástico. Cuando la madera se somete a tensión y alcanza el límite elástico, las fibras se deforman hasta alcanzar la “ruptura primaria”. Si se sigue aplicando tensión en la madera alcanzaremos la rotura de la madera, llamado “ruptura secundaria”. (Brudi, E. 2001).

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Tensión en kN/cm²
Punto sin retorno, las fibras comienzan a romperse
(deformación permanente)= Ruptura primaria

Gráfica 1: Límite de elasticidad en *Fagus sylvatica* (Brudi, E. 2001)

3.10 Cargas que actúan sobre el árbol

El peso muerto del árbol no supone ningún riesgo de fractura del árbol. Sí lo es el peso de la nieve o el hielo, así como el efecto del viento. Aunque el efecto del viento suele conllevar menos riesgo, es necesario de contemplarlo por tratarse de la acción más frecuente. El viento sobre las hojas, ramas y fustes genera un balanceo en el árbol que estimula el crecimiento de madera de reacción que, aunque en ocasiones pueda favorecer el crecimiento del árbol, otras veces produce un colapso estructural (Brudi, E. 2001)

3.10.1 El viento

El viento y el peso de la copa son las principales cargas que soporta el árbol en pie. La resistencia del árbol se basa en los momentos a torsión y a flexión (resistencia a ser torcido o doblado).

La resistencia a flexión del fuste por la acción del viento está altamente relacionada con la sección transversal del fuste, su rigidez y la capacidad de reaccionar frente al viento. Coder K.D, profesor de la Universidad de Georgia, observó que la madera que crecía más alejada del centro del fuste proporcionaba más resistencia por unidad de carga que la madera situada más cerca del centro del fuste. Así, pequeños incrementos en el diámetro



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

proporcionan grandes aumentos de resistencia. Su explicación está en que la fuerza que resiste a flexión una sección circular como la del tronco es directamente proporcional a cuatro veces el diámetro. Además de que la resistencia a fuerzas de torsión aumenta el doble que la resistencia a flexión (Coder, K.D., 2000).

La velocidad del viento varía con la altura y con la rugosidad del terreno en el que se encuentre el árbol. La rugosidad depende de la presencia de obstáculos en el entorno. En lugares sin nada de protección el viento alcanza su máxima velocidad a unos 250 metros de altura sobre el suelo. En áreas como las urbanas (zonas muy rugosas), donde existen edificaciones con más de dos plantas, la velocidad del viento se ralentiza como consecuencia de las turbulencias generadas por la presencia de obstáculos. En lugares con edificios elevados el viento puede alcanzar su velocidad máxima a una altura de 600 metros sobre el suelo. En estos entornos los árboles no necesitan fustes muy gruesos. Por el contrario, árboles que se encuentren aislados en zonas despejadas necesitan un tronco más grueso para soportar las cargas.

En resumen, a mayor altura sobre el suelo mayor es la velocidad del viento. Por tanto, los árboles de gran altura localizados en lugares sin obstáculos reciben cargas de viento muy superiores y necesitan una estructura más resistente (Brudi, E., 2001).

3.10.2 Defectos en la madera de los árboles en pie

La incidencia del geotropismo negativo de los árboles hace que estos crezcan con fustes rectos y con forma cónica. Sin embargo según su naturaleza o su localización, a veces aparecen una serie de defectos o anomalías defectos morfológicos del tronco, defectos provocados por agentes meteorológicos o heridas de madera de reacción, (compresión y reacción), entre otros.

La **curvatura** del tronco se presenta como un defecto morfológico. Variables como la espesura, viento, nieve y pendiente de la zona, obligan al árbol a desarrollar una curvatura simple o doble, que puede ser un inconveniente para las trozas destinadas a procesos industriales como el aserrado o el desenrollo (García, L., et al. 2003).

La curvatura simple de una troza o rama se mide mediante el cociente entre la flecha y la longitud de la troza o rama, ambos en las mismas unidades de medición y el cociente expresado en tanto por ciento. Esta curvatura simple también se puede medir como el cociente entre la flecha y el diámetro menor de la troza o rama.

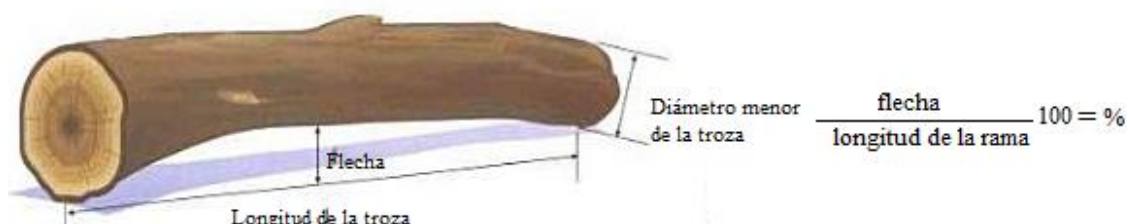


Imagen 6: Curvatura simple de la troza

La medición de la doble curvatura de la troza o rama se hace dividiendo la suma de las flechas y el diámetro menor de la troza o rama. Las mediciones expresadas en las mismas unidades de longitud, y el resultado final expresado en porcentaje.

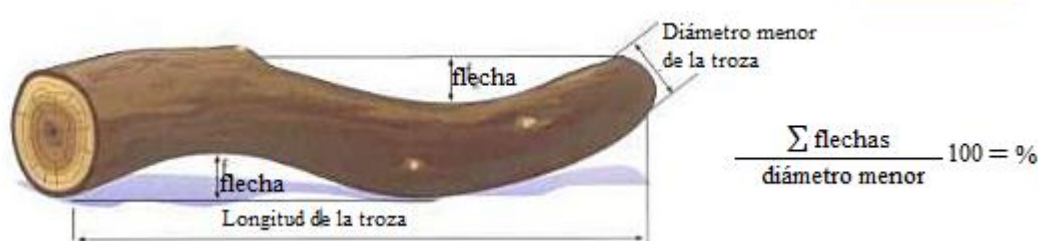


Imagen 7: Doble curvatura de la troza.

Los **nudos** son debidos a la inserción de ramas en el tronco y suponen un factor importante en la calidad de la madera, a más nudos peor es la calidad de la madera en resistencia de materiales. La presencia de nudos afecta a las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

En cuanto al estado físico, en la industria de la madera la presencia de nudos produce deformaciones en la madera. En el mecanizado los nudos contribuyen a una pérdida de productividad y al mayor desgaste de la herramienta.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

En cuanto al estado mecánico, la presencia de nudos disminuye de forma notable la resistencia de la madera, sobre todo a los esfuerzos de tracción y flexión. A mayor tamaño del nudo menor resistencia.

Los nudos se evalúan por su estado (sano, si corresponde a una rama viva, saltadizo, si corresponde a una rama muerta y podrido, si la rama muerta tiene ataque de hongos), por su tamaño, por su número y por su forma (Vignote, S., et al. 2013).

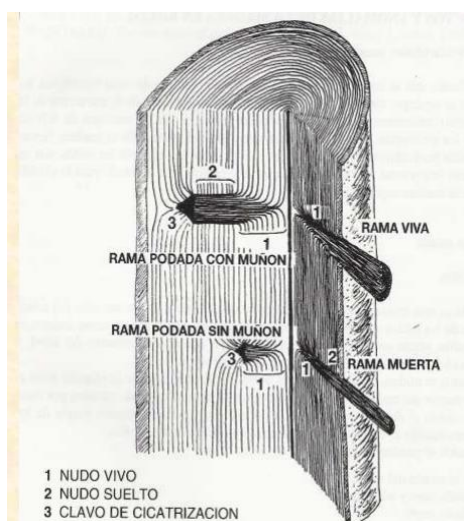


Imagen 8: Tipos de nudos (Montoya, 1988)

Las **acebolladuras** son defectos generados por pérdida de continuidad entre los anillos de crecimiento. Aparecen en el centro del árbol en pie durante el crecimiento, producidas según algunos autores por las tensiones de crecimiento de dirección radial (Archer, R.R., 1987). La probabilidad de aparición de acebolladuras aumenta con la edad del árbol y dentro de estos los que tienen un diámetro menor (Bonenfant, M., 1985).

3.11 Ensayos no destructivos en la madera (NDT)

Se definen los ensayos no destructivos (NDT, Non Destructive Techniques) como pruebas que se realizan en la madera para comprobar su calidad sin modificar sus



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

propiedades químicas, físicas, dimensionales o mecánicas. Los NDT permite detectar y evaluar propiedades de la madera.

Una de las formas de clasificar los ensayos no destructivos en la madera es según la naturaleza de la técnica en que se basan.

- Mecánicos
- Acústicos
- Electromagnéticos
- Nucleares
- Visuales

En este proyecto se llevaran a cabo ensayos visuales, mecánicos y electromagnéticos, que se explicaran en el capítulo de metodología, medios y equipos utilizados.

3.12 Ensayos a flexión en ramas de árboles

La resistencia a flexión de la madera es muy elevada en relación a su densidad. La flexión se origina por un momento flector, que produce en la sección de la pieza tensiones de compresión y de tracción paralelas a la fibra, que tienen sus valores máximos en las fibras extremas y que son nulas en fibra neutra (Arriaga, F., et al. 1994).

Así como se ha considerado al árbol como un voladizo empotrado vertical, consideraremos a la rama como una viga en voladizo sometido a condiciones de carga cambiantes.

En la imagen que se muestra a continuación (Imagen 9) se presentan los estados de desarrollo de las ramas y las cargas que soportan las acículas o ramas secundarias. Se muestran acículas de pino pero el resultado es comparable a las ramas secundarias con hojas de árboles caducifolios. En la figura, los modelos 1, 2 y 3 describen los primeros estadios de crecimiento, y el modelo 4 describe el crecimiento completo de la rama.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

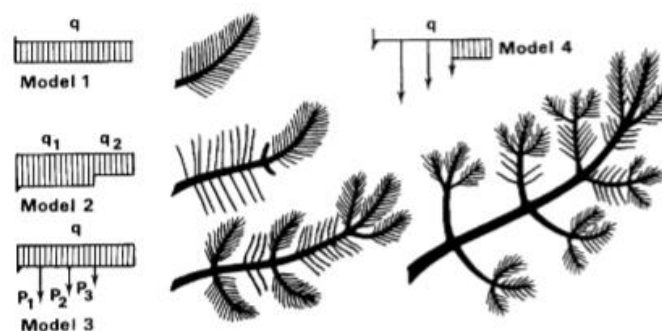


Imagen 9: Esquema del desarrollo de las ramas asociado a su distribución de cargas: q , q_1 , q_2 . Distribución de las cargas de acículas/hojas (g/cm). P_1 , P_2 , P_3 son las cargas concentradas en un punto (g) (Castera, P., Mortier, V. 1991)

Como se observa en la figura anterior, la posición de las hojas/ramas secundarias del eje principal de la rama tiene un importante efecto en la flexión de las ramas (Cannell et al. 1988).

Estudios en pies perennes demostraron que el crecimiento en longitud y diámetro está relacionado con el aumento del peso, y que a medida que estos aumentaban, el ángulo que forman las ramas con el fuste disminuye, como también el peso de la masa foliar de las ramas. En la tabla siguiente, se expresan valores del peso de la rama y de las hojas en relación a la longitud y diámetro de las ramas.

Whorl	Length (mm)	Diameter (mm)	Angle (°)	W(wood + bark) g	W (foliage) g
10	4590	44.90	60.0	3175.0	1900
9	3220	32.40	63.0	1264.0	760
8	3696	42.09	59.0	2590.0	2286
7	3100	40.30	46.0	1740.0	2890
6	2925	35.40	62.0	1621.0	2074
5	2548	33.80	62.5	1182.5	1560
4	2426	35.21	67.0	1521.0	2270
3	1955	30.00	—	940.0	1625

Tabla 1: Dimensiones media y peso de madera verde en pino (Bertram, J. 1989)

En estudios realizados sobre ensayos a flexión de ramas de árboles, se han analizado las relaciones presentes entre la longitud y el diámetro, y entre la longitud y el peso.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

3.12.1 Diámetro-longitud de la rama:

Patrick, C. y Mortier, P. (1991) establecen que existe una fuerte relación entre ambas longitudes, que se puede expresar bajo la siguiente ecuación:

$$D = a \cdot L^b$$

Donde a y b son parámetros.

b = 1 cuando el diámetro varía proporcionalmente al crecimiento en longitud (Bertram, 1989)

b = 0,5 cuando existe un estrés máximo permanente en la rama (Mahon, Mc., Kronauer, R.E., 1976).

a no se ha obtenido ningún valor en estudios de este campo.

D es el diámetro de la rama en mm.

L es la longitud de la rama en mm.

3.12.2 longitud-peso

El peso de la madera verde incrementa a medida que va creciendo en longitud. Este incremento medio de la rama en peso por verticilo aumenta desde el último verticilo crecido hasta la base de la rama.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

4. METODOLOGÍA

4.1 Medios y equipos utilizados

Para el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las ramas de haya procedentes del Montejo de la Sierra del presente proyecto, se realizaron unos ensayos en el Laboratorio de Estructuras de Madera del Centro de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (CIFOR-INIA).

Primero se describirán los aparatos utilizados para los métodos no destructivos (NDT) y a continuación el utilizado para el ensayo a flexión acompañado del material auxiliar.

4.2 Xilohigrometro

Se trata del modelo Hydromette HT 85T, de la marca GANN con una precisión de 0,1%. Es usado para la determinación del contenido de humedad de las piezas de madera siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN 13183-2:2002. Este equipo mide la resistencia al paso de corriente eléctrica y la relaciona directamente con el contenido de humedad.

Las mediciones que se realiza son precisas siempre y cuando el rango de humedad de la pieza esté comprendido entre el 8-25 % de humedad. Por encima del 25% de humedad, el aparato pierde mucha sensibilidad.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Imagen 10: Componentes del xilohigrómetro de resistencia (Fuente GANN).

La utilización del xilohigrómetro consiste en primer lugar en la selección de la especie, para el caso de *Fagus Sylvatica*, corresponde al número 2. A continuación se marca la temperatura de la madera aproximadamente, 22° C. Después, se insertan los electrodos en la madera a una profundidad aproximada de 25 mm y se realiza la medida en la unidad de control.

4.3 Balanza digital

Balanza SB16001 DeltaRange, con una capacidad de carga de 16 kg y una precisión de 0,01 kg. Utilizado para obtener la masa de la rama en gramos y poder calcular posteriormente densidades.



Imagen 11: Balanza digital del laboratorio INIA

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

4.4 Penetrómetro portátil

Se trata del Pilodyn Modelo 6J Forest. Se usa para mostrar la resistencia del material a la penetración de una varilla metálica de 2,5 mm de diámetro. Se utiliza para la evaluación de madera tanto de árboles vivos como en muestras.

La penetración se puede relacionar tanto con algunas propiedades físicas y mecánicas (densidad o dureza) como con el estado patológico de la madera.



Imagen 12: Componentes del Pilodyn 6J Forest (Perez, A. 2012)

El funcionamiento del Pilodyn consiste en presionar cargar y activar el disparador para lanzar la varilla sobre el material. La varilla es impulsada por un resorte con una energía de 6 julios. La penetración en el material se puede medir en la escala que incorpora el equipo con una precisión de 1 mm.

4.5 Microsecond Timer (MST)

Micro Second Timer de Fakopp Enterprise. Se usa para obtener la velocidad de propagación de una onda a través del material. La velocidad está relacionada con la resistencia, rigidez, defectos y patologías en la madera. Por ejemplo, la presencia de nudos provoca la curvatura de las fibras que conlleva una ralentización en la transmisión de la vibración, ya que actúa como un obstáculo.



Imagen 13: Micro Second Timer (Gil, M.C 2011).

El Microsecond Timer mide el tiempo que tarda una onda acústica en transmitirse de una testa a otra de la pieza. Esta onda se emite con un golpe del martillo sobre uno de los sensores localizado en la testa de la pieza que llega hasta el sensor receptor. Conocida la distancia entre sensores se puede calcular la velocidad en m/s. Los sensores son punzantes ayudando a su penetración en la madera. La penetración óptima para obtener un buen resultado es de 25 mm aproximadamente. La medición del tiempo la da en microsegundos, con una precisión de $\pm 3 \mu\text{s}$.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

4.6 Máquina universal con célula de carga de 60kN

En el presente proyecto se utiliza para realizar los ensayos mecánicos y obtener el Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR). Para el asiento de las ramas en los apoyos y para los puntos de aplicación de la carga se ha dispuesto unos adaptadores a las secciones circulares de las ramas.



Imagen 14: Máquina universal de ensayo en funcionamiento en el laboratorio de Estructuras de Madera del Cifor INIA.

El software que complementa al ensayo a flexión de las ramas es el IberTest en la Zona PELFIB-50. Con este programa se obtiene la carga de rotura, la deformación que sufre la probeta, la pendiente de la recta “Fuerza-Deformación” con su coeficiente de



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

determinación, el tiempo que se tarda en producirse la rotura y la carrera del puente. Todos ellos útiles para obtener posteriormente valores del MOE y MOR de las ramas.

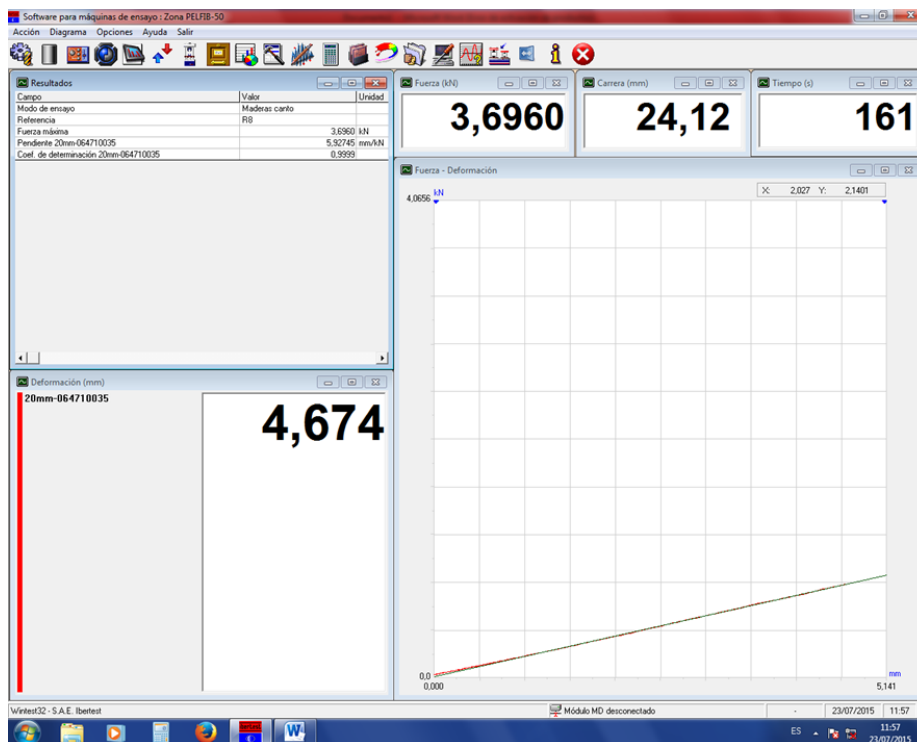


Imagen 15: Captura de pantalla del programa IberTest. Curva Fuerza-Deformación.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

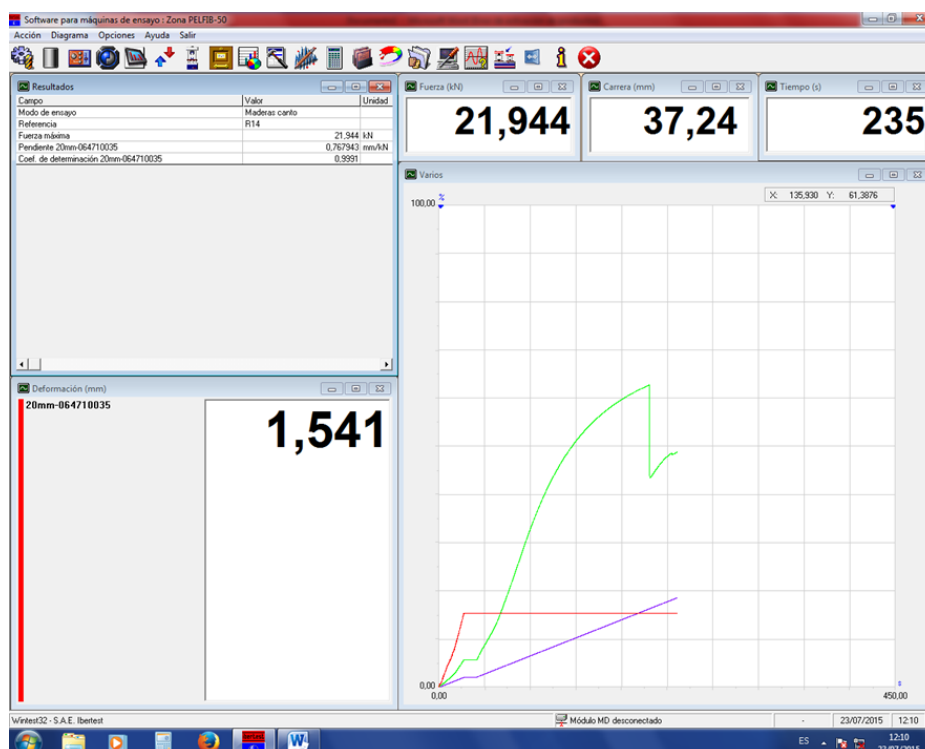


Imagen 16: Captura de pantalla del programa IberTest.

En la última imagen (Imagen 16) se muestran tres curvas. La roja muestra la deformación que va sufriendo la probeta a partir de la información que le llega del extensómetro. La verde muestra la fuerza que se está aplicando sobre la probeta. La azul muestra la carrera del puente, es decir, el desplazamiento de bajada del puente superior.

4.7 Material auxiliar

- Flexómetro

Instrumento empleado para dimensionar las probetas. Son flexómetros de 5 metros de longitud con precisión de 1 mm y tipo II. Con ellos se mide longitud de las ramas, tamaño de los nudos, longitud de grietas y posición de la rotura de las ramas en los ensayos a flexión.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Imagen 17: Flexómetro de laboratorio. (Izquierdo, S.T 2015)

- Escuadra metálica milimetrada

Instrumento empleado para medir con precisión la curvatura de las ramas en el eje vertical (Z). Son reglas de 22 cm de longitud con precisión de 1 mm. Son estables para mantenerse en posición vertical gracias al mango reforzado.



Imagen 18: Escuadras metálicas de laboratorio.

- Forcípula

Instrumento de metal que consta de una regla graduada y dos brazos perpendiculares a esta, uno fijo y otro móvil, que se desplaza a lo largo de la regla. La regla tiene una precisión de 1 mm y una longitud 60 cm. Se usa para medir diámetros de las ramas.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Imagen 19: Forcípula de laboratorio de longitud 60 cm medibles.

- Calibre digital

Instrumento utilizado para medir materiales de dimensiones pequeñas. Consta de una regla graduada y dos brazos perpendiculares a esta, uno fijo y otro móvil, que se desplaza a lo largo de la regla mostrando las dimensiones del material medido. Las dimensiones las da en milímetros o en pulgadas. En este trabajo se ha utilizado para la medición de las ramas de menor diámetro.



Imagen 20: Calibre digital de laboratorio.

4.8 Material de ensayo

El material utilizado para la realización del presente proyecto consiste en 17 ramas de haya procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra (*Fagus sylvatica* L.), con dimensiones variables desde los 900 milímetros hasta los 2.000 milímetros de longitud, y diámetros desde los 30 hasta los 120 milímetros. Se han seleccionado al azar ramas verdes y sanas en función de la disponibilidad en el monte y sin ningún criterio previo, por lo que se consideran representativas.

Las ramas de estudio presentan diferentes peculiaridades como curvatura, nudos, fendas, protuberancias, etc., que afectaran a sus propiedades físicas y mecánicas.

Cada rama ha sido analizada en detalle. Se ha realizado una serie de mediciones para obtener sus propiedades físicas y mecánicas. Todas las mediciones se han llevado a cabo en el Laboratorio de Estructuras de Madera del Centro de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (CIFOR-INIA).



Imagen 21: Las ramas de estudio.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

4.9 Desarrollo experimental

El presente proyecto comienza con varias visitas a campo para visualizar la zona de estudio y sus componentes, así como el estado de los árboles y el medio que les rodea. Se recogieron ramas de los arboles allí presentes, de las cuales se seleccionaron las 17 piezas que son objeto de este estudio.

Una vez en el laboratorio se procedió a dimensionar y clasificar cada una de las ramas, posteriormente se realizaron los ensayos no destructivos y finalmente se sometieron al ensayo mecánico.

Dado que se trata de un estudio que pretende analizar el comportamiento mecánico de árboles y ramas en pie, por tanto en verde, se ha establecido una humedad de referencia del 30% al que han sido corregidos los resultados de los ensayos.

4.10 Dimensiones y clasificación

Las operaciones para el registro y descripción de cada rama son las siguientes:

1. Colocación de un flexómetro sobre una mesa para tener un plano y eje de referencia sobre los que colocar y medir las ramas, de forma que queden lo más paralelas posible en contacto con el flexómetro.
2. Numeración de las ramas con rotulador permanente.
3. Colocación de la rama en la proximidad del flexómetro, procurando que la orientación de las ramas sea en sentido creciente (con el diámetro mayor en el origen y el diámetro menor en el extremo). Se definen los ejes longitudinales (X), y transversales (Y, Z) en la mesa de trabajo. Para cada rama se realizan las mediciones en dos posiciones, la posición natural que la rama adopta sobre la mesa de trabajo y la posición girada 90°. De esta forma se obtiene un alzado (proyección en el plano XZ) y una planta (proyección en el plano XY) de cada pieza.
4. Medición de su longitud con otro flexómetro sobre ella, respetando sus curvaturas.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

5. División de la rama en secciones cada 10 cm, para una mayor facilidad en la identificación de irregularidades o defectos en las ramas.



Imagen 22: Rama en la mesa de trabajo, dividida en secciones de 10 cm, la identificación de un nudo y el estadillo donde se toma nota.

6. Medición de los diámetros en cada sección. En cada sección se miden dos diámetros (en vertical y en horizontal según el plano de trabajo), tomando como el valor del diámetro de la sección la media de ambos valores. La medición se hace con el calibre para ramas de menor dimensión y con la forcípula para las de mayor dimensión. Se identificaron sólo los nudos cuyo diámetro mayor era superior a 1 centímetro. Los nudos se han enumerado en cada rama para una mejor identificación.
7. Identificación de los defectos de cada rama, así como nudos, protuberancias, fendas, midiéndose posición y tamaño de cada uno. Señalamiento de cada uno con un rotulador.
8. Obtención de las coordenadas de las ramas en los ejes X (longitudinal), Y, Z. Para obtener la forma de las ramas en el plano XY y en el plano XZ. Esto es posible con la ayuda de la escuadra metálica y flexómetro.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Imagen 23: Medición de las coordenadas Z de las ramas.

9. Pesada de cada una de las ramas en la balanza digital del laboratorio.

4.11 Ensayos no destructivos

Una vez registrada y caracterizada cada rama se prosigue con la realización de los ensayos no destructivos (NDT) decididos a realizar en el presente proyecto. Estos son:

- Medición del contenido de humedad con xilohigrómetro conforme a la norma UNE-EN 13183-2: 2002.
- Medición de la resistencia a la penetración de una varilla metálica mediante Pilodyn 6J Forest.
- Medición de la velocidad de propagación de una onda acústica en recorrer la probeta con Microsecond Timer (MST).

4.12 Determinación del contenido de humedad, xilohigrómetro

Para la medición del contenido de humedad en las ramas se ha utilizado un xilohigrómetro de tipo resistencia eléctrica, según establece el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13183-2:2002.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Se ha hecho una lectura en el momento de iniciar las mediciones en cada rama. Dado el poco tiempo transcurrido entre esta medición y el resto de los ensayos, se ha considerado que el valor obtenido se ha mantenido constante durante todo el proceso de estudio en laboratorio.

En la probeta se clavan los electrodos del xilohigrómetro con una profundidad aproximada de 1/3 de la anchura, indicada según la norma UNE- EN 131832:2002, y en dirección perpendicular a la fibra. Este equipo mide la resistencia que ofrece la madera al paso de la corriente eléctrica, que a la vez es directamente proporcional al contenido de humedad. En el equipo se indica el código de la especie, para el caso de *Fagus sylvatica* L. se corresponde con el número 2. También se introduce la temperatura ambiente en laboratorio, en este caso 22°C.



Imagen 24: Xilohigrómetro midiendo la humedad de la probeta (Fuente GANN).

4.13 Profundidad de penetración de una varilla, Pilodyn

Para la medición con Pilodyn primero se carga el muelle con la ayuda de la baqueta cargadora, de tal forma que la varilla metálica penetradora quede introducida dentro del pilodyn. Una vez retirada la baqueta cargadora, se posiciona el pilodyn sobre la probeta en un lugar exento de defectos y se dispara la varilla con el botón disparador. La varilla penetra con una fuerza de 6 Julios en la madera a una profundidad que depende de las características de la madera. Sin dejar de presionar el equipo contra la probeta, la escala de lectura del propio aparato permite medir la profundidad que ha alcanzado la varilla en la probeta.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Imagen 25: Pilodyn 6J Forest (Izquierdo, S.T., 2015).

4.14 Velocidad de propagación de onda acústica, Microsecond Timer

El Microsecond Timer mide el tiempo que tarda una onda acústica en transmitirse de una testa a otra de la pieza.

En primer lugar se clavan los sensores emisor y receptor en el centro de cada testa hasta una profundidad de no más de 25mm. Posteriormente, se golpea con un martillo de cabezal de goma sobre el sensor emisor para emitir la onda que será captada por el sensor receptor en la otra testa de la rama. El equipo muestra automáticamente la lectura del tiempo de propagación de la onda en microsegundos.

Se realizan al menos dos lecturas del tiempo de transmisión de la onda en cada pieza. El valor a considerar será la media aritmética entre las lecturas.



Imagen 26: MTS (Fuente CETEMAS).

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Una vez obtenido el tiempo que tarda la onda en recorrer la pieza y conociendo la longitud del recorrido, se puede conocer la velocidad de transmisión de la onda mediante la expresión.

Una vez obtenida la velocidad, y con el valor de la densidad obtenido del peso de las ramas y de su volumen, se puede obtener el módulo de elasticidad dinámico mediante la expresión:

$$MOEdin(\frac{N}{mm^2}) = v^2 \cdot \rho$$

Donde:

v velocidad de la onda en m/s.

ρ es la densidad de la probeta medida en Kg/m³.

4.15 Determinación de la densidad

Para la determinación de la densidad se ha pesado cada una de las ramas en la balanza. El volumen total de la rama se ha calculado como el sumatorio de los volúmenes de cada sección de 10 cm.

La densidad se estima como el cociente de la masa (gr) y el sumatorio del volumen de las secciones (mm³), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{masa (gr)}{\sum volumen (mm^3)}$$



Imagen 27: Detalle del señalamiento de las secciones cada 10 cm en la rama.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

El valor de densidad obtenido se ha corregido a un valor de referencia del 30 % de humedad a razón de 0,5 % de densidad por cada variación de un punto porcentual del contenido de humedad.

4.16 Ensayos mecánicos a flexión: MOE y MOR

En el laboratorio se realizaron ensayos a flexión en las 17 ramas recogidas del Hayedo de Montejo con el objetivo de conocer las propiedades mecánicas como la resistencia (MOR, Modulus of Rupture) y el módulo de elasticidad (MOE, Modulus of Elasticity).

Estos ensayos se han realizado tratando de adaptarse a la norma UNE EN 408, aplicando la carga en dos puntos que se encuentran a una misma distancia de los puntos de apoyo, como a continuación se muestra:

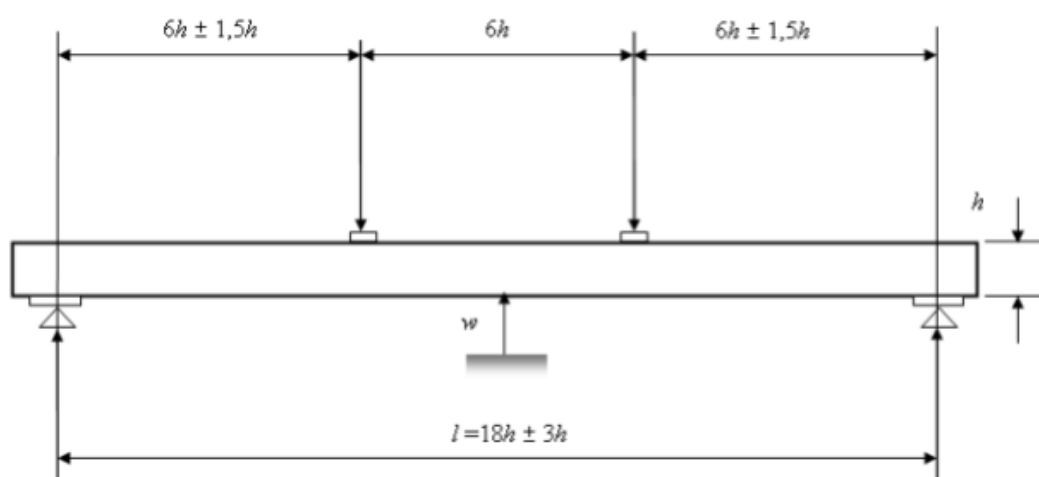


Figura 1: Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión (UNE EN 408, 2010)

Dada la dispersión de diámetros se ha hecho una clasificación de las ramas en dos grupos para ensayar con diferentes luces y manteniendo dentro de lo posible la esbeltez de las ramas. El primer grupo está formado por ramas con un diámetro medio no superior a 69 mm (Grupo 1), y el segundo grupo formado por ramas con un diámetro medio superior a 69 mm (Grupo 2).

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

- Grupo 1

Grupo de ramas cuyo diámetro medio no es superior a 69 mm. El diámetro medio de las ramas de este grupo es 48,4 mm.

La luz entre los apoyos según la norma UNE EN 408 debería ser $18h$, es decir 18 veces el diámetro medio de las ramas. Para este grupo se ha tomado una luz de ensayo $18 \times 48,4 = 871,2$ mm. La distancia entre las cargas a aplicar debe de ser $6h$, es decir, seis veces el diámetro medio de las ramas. En este caso $6 \times 48,4 = 290,4$ mm.

Se ha estimado un intervalo de fuerza para el cual obtener la deformación que sufre la rama hasta un valor máximo de 0,8 kN, momento en el cuál se retira el extensómetro para continuar el ensayo hasta la rotura.

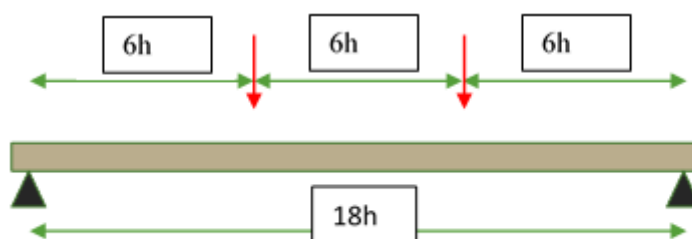


Figura 2: Disposición de ensayo a flexión en ramas del Grupo 1 (UNE EN408, 2010).

- Grupo 2

Grupo de ramas cuyo diámetro medio es superior a 69 mm. El diámetro medio de las ramas de este grupo es 93,5 mm.

La longitud de estas ramas no alcanza una dimension que permita aplicar la disposición de ensayo prescrita por la norma UNE-EN 48. Para la luz de ensayo no se aplicó la distancia de 18 veces el diámetro y se limitó a 9 veces el diámetro medio del grupo de ramas, quedando una luz de $9 \times 93,5 = 841,5$ mm. La distancia entre puntos de aplicación de la carga es seis veces el diámetro medio, es decir $6 \times 93,5 = 561$ mm.

Se ha estimado un intervalo de fuerza para el cual obtener la deformación que sufre la rama hasta un valor máximo de 2,0 kN, momento en el cuál se retira el extensómetro para continuar el ensayo hasta la rotura.

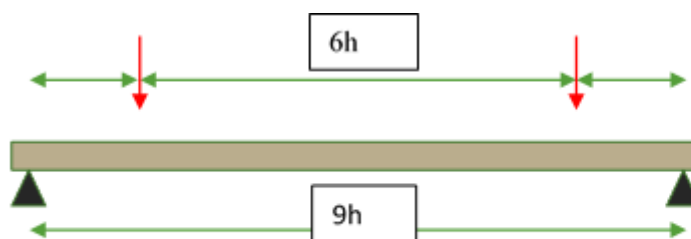


Figura 3: Disposición de ensayo a flexión en ramas del Grupo 2.

Esta disposición, si bien no se ajusta a la norma, es la mejor disposición posible dadas las dimensiones de las ramas disponibles. La distancia entre los puntos de aplicación de la carga y los apoyos es superior a 2,5 veces el diámetro, por lo que se reduce en la medida de lo posible la transmisión de carga a los apoyos mediante tensiones de compresión perpendicular a la fibra.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

4.16.1 Cálculo del módulo de elasticidad (MOE)

Como bien se ha dicho anteriormente, una de las aplicaciones del ensayo es el cálculo del módulo de elasticidad (MOE), que se define como la relación entre la tensión y la deformación unitaria. En este caso se calculó a partir de la expresión facilitada por la norma UNE EN 408 para secciones rectangulares, adaptada al momento de inercia de una sección circular.

Ecuación de la norma UNE EN 408 para secciones rectangulares:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

Donde:

- a distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión, en mm.
- b anchura de la sección transversal en un ensayo a flexión, o la menor dimensión de la sección transversal, en mm.
- h altura de la sección en los ensayos de flexión, o dimensión mayor de la sección, o altura de la probeta en los ensayos en dirección perpendicular a la fibra, en mm.
- F₂-F₁ incremento de carga sobre la recta regresión (carga deformación) con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor, en N.
- l luz en flexión, en mm.
- w₂-w₁ es el incremento de deformación correspondiente al tramo de carga F₂-F₁, en mm
- G módulo de elasticidad transversal, en N/mm². Si no se conoce G se puede tomar como infinito, lo que equivale a suponer que se desprecia la deformación por cortante.

Ecuación modificada para el caso de sección circular, sin efecto del cortante:

$$E = \frac{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3}{6 \cdot \pi \cdot r^4 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)}$$

Donde todos los términos son iguales a la anterior, excepto:

r radio medio de la rama, en mm.

De acuerdo a lo descrito en la norma UNE-En 408 se ha considerado un valor de módulo de elasticidad transversal (G) infinito. De esta forma se sabe que se comete un error que puede ser mayor en las ramas del Grupo 2, de menor relación entre luz y diámetro.

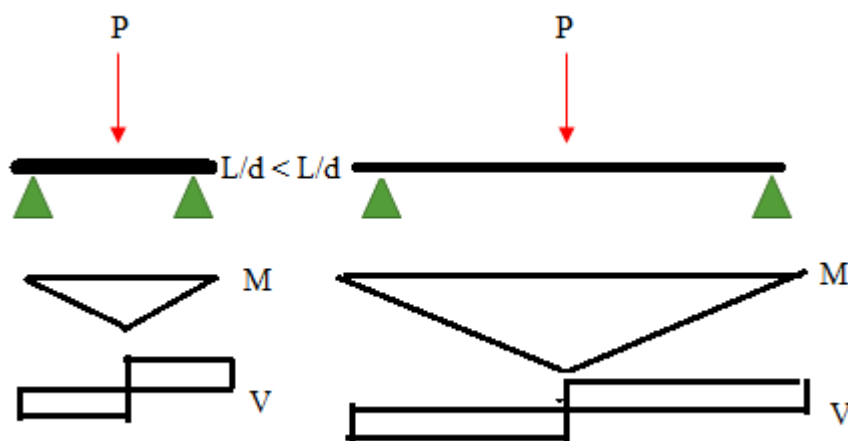


Figura 4: Comparación del cortante y el momento flector con distintas esbelteces. A la izquierda Grupo 1, a la derecha Grupo 2.

La imagen anterior ilustra la diferencia de esfuerzos debida a la diferencia de esbeltez para un ensayo con carga puntual. En el ensayo con mayor longitud y menor grosor se obtiene un momento flector (M) mucho mayor respecto al cortante en el caso de menor luz. Por ello, el efecto relativo del cortante es mayor en las ramas del Grupo 1.

4.16.2 Cálculo del módulo de rotura (MOR)

Mediante el ensayo a flexión también se determina la resistencia a flexión o módulo de rotura (MOR), que se define como la tensión máxima que una probeta de madera puede soportar antes de la rotura, expresada en N/mm^2 .

De acuerdo a la norma UNE EN 408 se prevé que la rotura se produzca en el tramo central de la pieza, puesto que es la zona en la que se produce el momento flector máximo y no hay influencia del cortante.

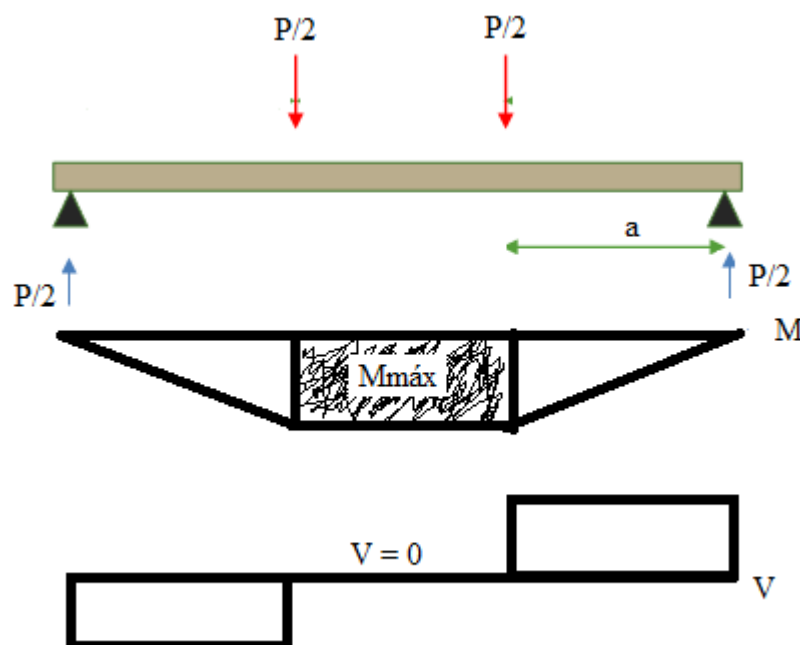


Figura 5: Representación de momento y cortante a esperar en los ensayos a flexión.

El momento máximo ($M_{\text{máx}}$) es igual al producto de la reacción ejercida en cada apoyo ($P/2$) por la distancia que hay entre el apoyo y el punto de aplicación de la carga (a). Una vez calculados el momento flector máximo para la carga de rotura ($M_{\text{máx}}$) y el módulo resistente de la sección de la rama (W_{rot}) se puede calcular la tensión de rotura (σ_{rot}).



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Módulo resistente de una sección circular de radio r: $W_{rot} (mm^3) = \frac{\pi r^3}{4}$

Momento máximo de rotura: $M_{rot} (N \cdot mm) = \frac{P_{rot}}{2} \times a$

Tensión de rotura o módulo de rotura: $\sigma_{rot} (N/mm^2) = \frac{M_{rot}}{W_{rot}}$



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez descrita la metodología seguida en el presente proyecto, a partir de 17 ramas recogidas del Hayedo de Montejo de la Sierra en las que se han hecho ensayos físicos y mecánicos, se procede a describir los resultados obtenidos.

Primero se muestran las variables de estudio independientes, para un mejor entendimiento se mostraran los datos comparando el Grupo 1 de ramas, caracterizado por tener sus ramas un diámetro medio inferior a 69 mm, con el Grupo 2, caracterizado por tener sus ramas un diámetro medio superior a 69 mm.

Para el estudio de las variables independientes se han realizado gráficas de Cajas y Bigotes que proporcionan la media de cada grupo, la mediana, el valor máximo, el valor mínimo y la variación de datos de la variable analizada. Además de esta gráfica se ha calculado la varianza y el coeficiente de variación de cada grupo.

A continuación, se muestran posibles relaciones entre variables.

5.1 Evaluación visual de las muestras escogidas

En la evaluación llevada a cabo en el laboratorio de cada una de las ramas se observó que los defectos a destacar eran presencia de nudos en la mayoría de secciones de las ramas, fendas visibles en las secciones transversales y curvatura de las ramas.

A continuación se muestra una tabla en la que se observa el número de nudos por rama y por grupo, así como el diámetro medio de estos nudos. También se muestra una gráfica en la que se observan el número de nudos por rama y por grupo.

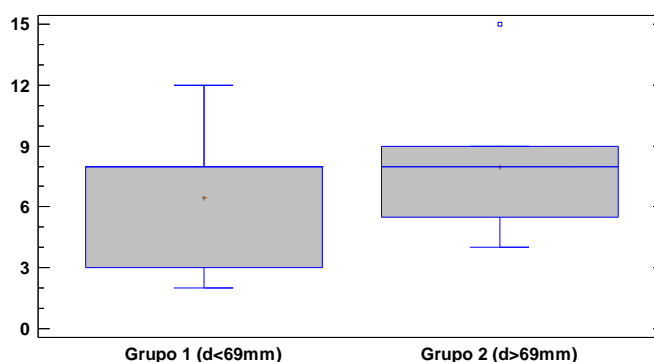


Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Grupo 1 (d < 69 mm)			Grupo 2 (d > 69 mm)		
Rama	d med	nº de nudos	Ramas	d med	nº de nudos
2	16,83	12	1	11,5	15
5	14,625	8	4	21,25	4
6	18,6	3	3	19	5
7	20,5	2	10	13,6	6
8	13,3	3	11	25	9
9	13,25	4	14	12,22	9
12	16,87	8	15	26,71	7
13	19,375	8	16	22,78	9
17	21	10	TOTAL	19,0075	64
TOTAL	17,15	58			

Tabla 2: Número de nudos y su diámetro por rama y grupo.

Gráfico Caja y Bigotes



Gráfica 2: Comparación de nº de nudos entre los dos grupos.

Se observa en la gráfica de caja y bigotes que en el Grupo 2 existe un valor atípico que se corresponde con la rama nº1 que presenta 15 nudos.

Para un total de 122 nudos identificados, en el Grupo 1 hay 58 nudos con un diámetro medio de 17,15 mm; un diámetro mínimo medio de 13,25 mm y un máximo de 21 mm. En el grupo 2 hay 64 nudos con un diámetro medio de 19 mm, un diámetro mínimo de 11,5 y un máximo de 26,71 mm.

La media de diámetros medios del grupo 2, es mayor porque la rama 15 que pertenece a este grupo, posee un nudo de 80mm. Sin este nudo, ambas medias hubiesen sido similares.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Como información complementaria se analizó las longitudes de las ramas, obteniéndose una media de 1,26 metros de longitud con un número medio de 7 nudos por cada rama.

Las fendas encontradas en los extremos de la rama no se van a tener en cuenta ya que en los ensayos a flexión realizados, no se ha observado relación entre estas fendas y los nudos de rotura.

Se ha observado que en aquellas ramas que poseían ramas secundarias de al menos 2 centímetros de diámetro mayor, presentaban una curvatura notable en relación a su longitud.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los defectos encontrados en las ramas, así como su longitud, masa y volumen.

Rama	nº nudos	Fendas (mm)	Otras	Longitud (mm)	masa (kg)	Vol (m³)
1	16	6, 40<F<60		1225	8,87	0,011330
2	12		Bifurcación secc: 1200	1670	3,885	0,004985
3	5	5, 50<F<75	Bifurcación secc: 1000	1050	5,714	0,008211
4	4	5, 45<F<90		1064	6,63	0,008437
5	8	1, F=30		900	1,4565	0,002212
6	3			1185	1,021	0,001493
7	2		Bifurcación secc: 800	1185	0,8673	0,001333
8	3			914	0,9905	0,001658
9	4			1135	1,2003	0,001630
10	6	9, 40<F<65		955	4,193	0,006229
11	9			1000	3,536	0,004746
12	8			1465	1,9481	0,002833
13	8			1983	3,0622	0,003687
14	9	3, 25<F<45		1500	5,805	0,007656
15	7	7, 17<F<40	nudo secc 400mm ocupa 8cm	1190	13,341	0,016572
16	9	9, 17<F<56	360-600mm protuberancia	1415	5,364	0,006808
17	10			1650	3,011	0,003934

Tabla 3: Defectos y mediciones en las ramas de ensayo.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

5.2 Determinación de la densidad

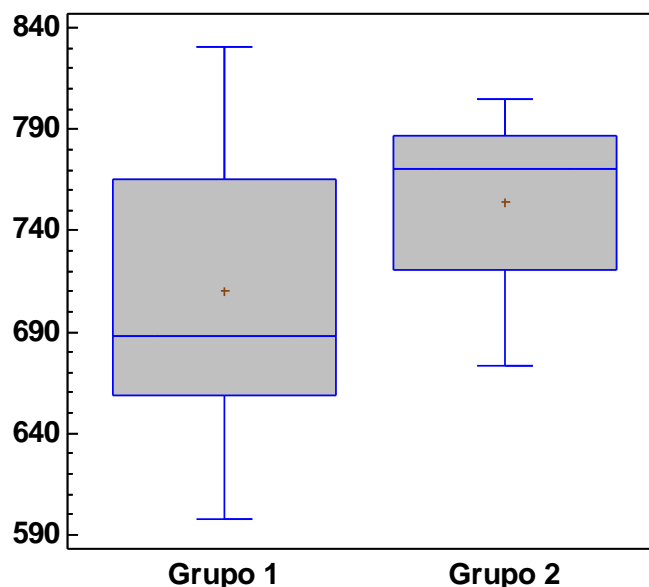
A continuación se muestra una tabla con los valores de densidad obtenidos para cada rama:

Ramas	Grupo 1	Grupo 2	Ramas
2	779,40	782,88	1
5	658,52	695,93	3
6	683,64	785,84	4
7	650,44	673,18	10
8	597,49	745,00	11
9	736,16	758,20	14
12	687,65	805,04	15
13	830,61	787,84	16
17	765,44		

Tabla 4: Densidades de las ramas.

A simple vista no se puede obtener gran información de las densidades obtenidas, sólo que en el grupo 1 se encuentra el valor más bajo de las densidades. Para ello se hace uso de la gráfica de Caja y Bigotes.

Gráfico Caja y Bigotes



Gráfica 3: Comparación de densidades.

De la gráfica se deduce que el grupo 1 tiene una densidad media relativamente inferior y con valores más dispersos, aunque la diferencia es poco representativa estadísticamente.

A continuación se muestra otros valores estadísticos calculados:

Grupo 1:

- Un total de 9 muestras que varían entre 587,49 kg/m³ y 830,61 kg/m³.
- Con un valor medio de 709,03 kg/m³.
- Coeficiente de variación del 10,35%
- Con una varianza de 5396,44

Grupo 2:

- Un total de 8 muestras que varían entre 673,18 kg/m³ y 805,04 kg/m³.
- Con un valor medio de 754,24 kg/m³.
- Coeficiente de variación del 6,25%
- Con una varianza de 2228,61.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

De este análisis se deduce que el grupo 2 tiene una densidad media más elevada que el grupo 1. Además el coeficiente de variación es menor, es decir, las densidades calculadas en el grupo 2 son más homogéneas. La razón de varianza que hay entre los dos grupos es 2,42.

La densidad media de las ramas recogidas en el hayedo es de 730,78 kg/m³.

5.3 Determinación de la humedad

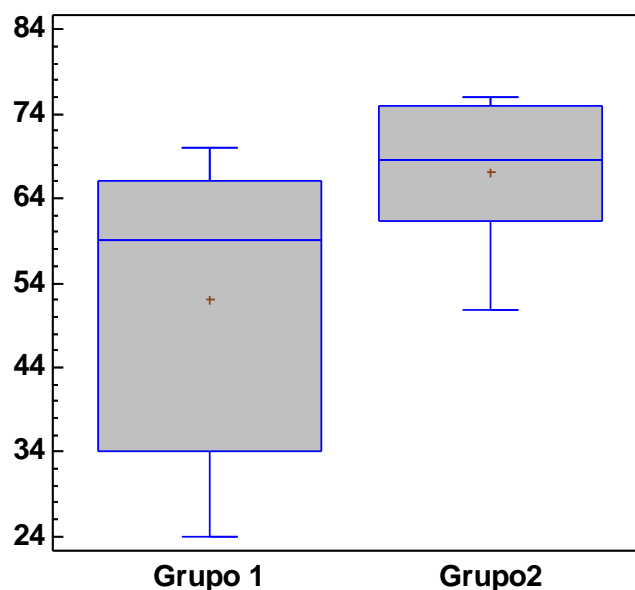
La humedad de las ramas se ha obtenido a partir del xilohigrómetro, sabiendo que con este equipo se comete un error de entre 1 y 3 puntos porcentuales y que sus lecturas se consideran válidas por debajo del punto de saturación de la fibra. Valores por encima del 30 % se consideran informativos. Los valores obtenidos con el xilohigrómetro son los siguientes:

	HUMEDAD (%)		
Ramas	Grupo 1	Grupo2	Ramas
2	66,00	65,00	1
5	67,50	67,00	3
6	30,00	76,00	4
7	59,00	74,70	10
8	51,00	70,00	11
9	24,00	57,80	14
12	70,00	75,20	15
13	34,00	50,70	16
17	66,00		

Tabla 5: Valores de la humedad presente en las ramas.

En la tabla se observa que en el grupo 1, se encuentra la rama nº 9 con una humedad del 24%, a lo largo del proyecto se analizará las consecuencias de esta humedad tan baja para una madera recién sacada del monte. También en el grupo 1, se encuentran las ramas nº 6 y nº 13 con humedad muy próxima al PSF.

Gráfico Caja y Bigotes



Gráfica 4: Comparación de las humedades en los dos grupos.

En la gráfica se observa que el grupo 1 tiene un segmento de mayor longitud ya que los valores de humedad van desde el 24% hasta el 70%, es decir hay un rango de humedades más amplio que en el grupo 2. El grupo 2 tiene la humedad media por encima del grupo 1, casi en el extremo superior del segmento del grupo 1 y su Caja y Bigote es más estrecho ya que los valores de humedad son más homogéneos. Sin embargo, ambos grupos tienen la media por debajo de la mediana.

A continuación se muestra otros valores estadísticos calculados:

Grupo 1:

- Un total de 9 muestras que varían entre el valor 24,00 % y 70,00%
- Con un valor medio de 52,00%
- Coeficiente de variación del 34,70%
- Con una varianza 324,78

Grupo 2:

- Un total de 8 muestras que varían entre el valor 50,70% y 76,00%
- Con un valor medio de 67,05%
- Coeficiente de variación del 13,47%



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

- Con una varianza de 81,55

El valor medio de la humedad en el grupo 2 es mayor con un 67,05 %, frente al 52,00% del grupo 1, y el coeficiente de variación en el grupo 2 es menor con un 13,47% de variación de humedad en su grupo frente al 34,7% del grupo 1. La razón de varianza que existe entre ambos es de 3,98.

5.4 Determinación de la profundidad de penetración con una varilla

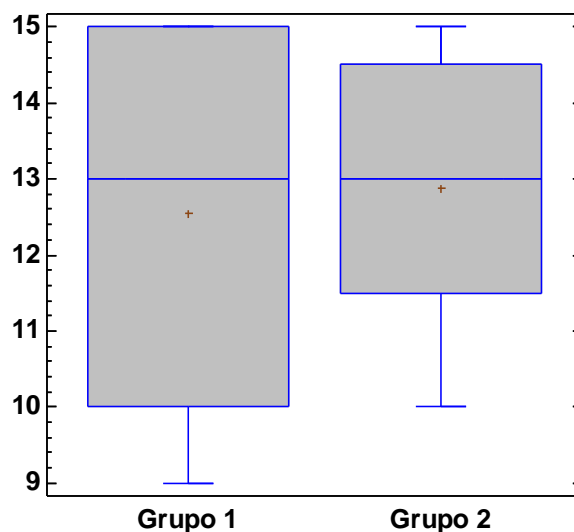
La determinación de la profundidad de penetración en las ramas de estudio proporciona información para conocer el estado patológico y dureza como ejemplo de propiedades físicas, como también información para las propiedades mecánicas. A continuación se muestra las profundidades en mm alcanzadas con la varilla del pilodyn:

PILODYN (mm)			
Ramas	Grupo 1	Grupo 2	Ramas
2	13	12	1
5	15	15	3
6	10	13	4
7	15	14	10
8	14	15	11
9	9	11	14
12	15	13	15
13	10	10	16
17	12		

Tabla 6: Valores de penetración en las ramas.

A continuación se muestra la gráfica de Caja y Bigotes con el que se pretende obtener más información de las muestras. En el eje vertical se muestran las profundidades del pilodyn en mm.

Gráfico Caja y Bigotes



Gráfica 5: Comparación de la penetración entre el grupo 1 y 2.

En la gráfica se observa que no hay diferencias significativas entre los valores medios de ambos grupos, aunque en el grupo existe mayor dispersión de valores.

A continuación se muestra otros valores estadísticos calculados:

Grupo 1:

- Un total de 9 muestras que varían entre el valor 9,0 mm y 15,00 mm de profundidad.
- Con un valor medio de 12,56 mm de penetración.
- Coeficiente de variación del 19,14%
- Con una varianza 5,78.

Grupo 2:

- Un total de 8 muestras que varían entre el valor 10,00 mm y 15,00 mm de profundidad
- Con un valor medio de 12,87 mm de penetración.
- Coeficiente de variación del 14,04%
- Con una varianza de 3,27.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Como datos generales, ambos grupos tienen una media muy parecida, además de tener una mediana igual a 13 mm y finalmente la razón de varianza que existe entre los dos grupos es de 1,76, un valor bajo, con el que se puede concluir que entre los dos grupos no existen diferencias estadísticas significativas.

5.5 Cálculo del módulo de elasticidad dinámico (MOEdin)

De acuerdo a lo descrito en la metodología, el MOE dinámico se obtiene de la expresión:

$$MOEdin\left(\frac{N}{mm^2}\right) = v^2 \cdot \rho$$

Donde v es la velocidad de propagación de la onda calculada a partir del Microsecond Timer y ρ la densidad.

Los resultados obtenidos son los que se muestran en la tabla:

Rama	Velocidad (m/s)	densidad (kg/m³)	MOEdin (N/mm²)
<u>1</u>	<u>4375,00</u>	<u>782,88</u>	<u>14984,90</u>
2	3560,77	779,40	9882,12
<u>3</u>	<u>4268,29</u>	<u>695,93</u>	<u>12678,62</u>
<u>4</u>	<u>3955,39</u>	<u>785,84</u>	<u>12294,51</u>
5	3846,15	658,52	9741,40
6	3950,00	683,64	10666,52
7	3847,40	650,44	9628,15
8	4291,08	597,49	11001,74
9	3900,34	736,16	11198,95
<u>10</u>	<u>4591,35</u>	<u>673,18</u>	<u>14190,96</u>
<u>11</u>	<u>2631,58</u>	<u>745,00</u>	<u>5159,29</u>
12	3521,63	687,65	8528,18
13	3771,43	830,61	11814,31
<u>14</u>	<u>3886,01</u>	<u>758,20</u>	<u>11449,67</u>
<u>15</u>	<u>4311,59</u>	<u>805,03</u>	<u>14965,55</u>
<u>16</u>	<u>4137,43</u>	<u>787,84</u>	<u>13486,52</u>

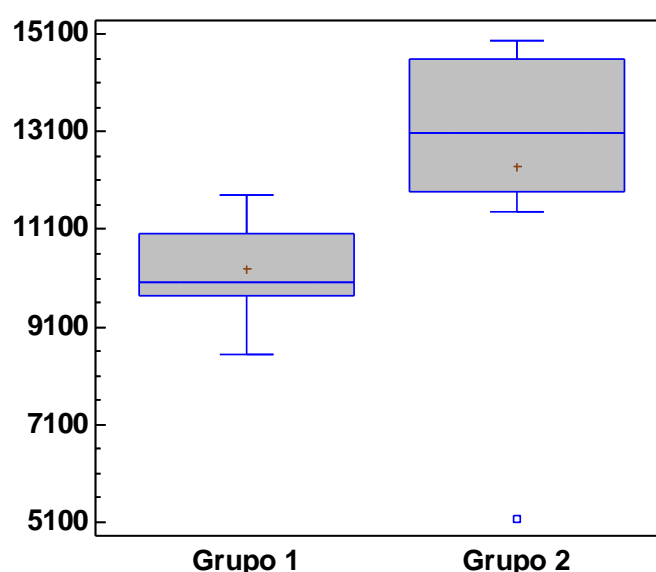
17	3618,42	765,44	10021,82
----	---------	--------	----------

Tabla 7: Valores del MOE dinámico.

Los valores que aparecen subrayados son las ramas del grupo 2 (diámetro medio > 69 mm).

A continuación se muestra la gráfica de Cajas y Bigotes del MOE dinámico diferenciando los dos grupos:

Gráfico Caja y Bigotes



Gráfica 6: Comparación del MOE dinámico del grupo 1 y del grupo 2.

En la gráfica observamos que en el grupo 2 hay una rama que tiene el valor del MOE fuera de la caja, es la rama nº 11 y es como consecuencia de su baja velocidad 2631,58 m/s. A pesar de este valor atípico y excepcionalmente bajo, se observa una tendencia clara hacia valores mayores de MOEdin en el grupo 2.

Los valores estadísticos obtenidos son los siguientes:

Grupo 1:

- Un total de 9 muestras que varían entre 8.528,18 y 11.814,3 N/mm²
- Con un valor medio del MOE de 10.275,9 N/mm².
- Coeficiente de variación del 9,6%

Grupo 2:



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

- Un total de 8 muestras que varían entre 5.159,29 N/mm² y 14.984,9 N/mm²
- Con un valor medio del MOE de 12.401,3 N/mm².
- Coeficiente de variación del 25,7%

Por otro lado, dada la influencia del contenido de humedad en la densidad y en las propiedades mecánicas, se ha ajustado el valor obtenido a un contenido de humedad de referencia del 30%, correspondiente con el punto de saturación de la fibra.

Su cálculo al 30 % de humedad se consigue con la densidad de las ramas corregida al 30% de humedad de acuerdo a la norma UNE EN 384. Esta norma establece que cuando el contenido de humedad sea mayor del 12%, la densidad debe disminuir un 0,5 % por cada variación del 1% del contenido de humedad.

A continuación se muestra una tabla en la que se ilustran las ramas con su densidad en verde y con su densidad al en el PSF (H=30%).

Rama	Densidad (kg/m³)	H(%)	Densidad al 30% (kg/m³)
1	782,88	65,00	645,88
2	779,40	66,00	639,11
3	695,93	67,00	567,18
4	785,84	76,00	605,09
5	658,52	67,50	535,05
6	683,64	30,00	683,64
7	650,44	59,00	556,13
8	597,49	51,00	534,75
9	736,16	24,00	758,24
10	673,18	74,70	522,72
11	745,00	70,00	596,00
12	687,65	70,00	550,12
13	830,61	34,00	814,00
14	758,20	57,80	652,81
15	805,04	75,20	623,10
16	787,84	50,70	706,30
17	765,44	66,00	627,66

Tabla 8: Densidades de las ramas al 30% de humedad.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

A continuación se muestra el MOE en el PSF (H=30%) comparado con el obtenido inicialmente.

Rama	v ² (m/s)	densidad (30%)	MOEdin(H=30%) (N/mm ²)	MOEdin (N/mm ²)
1	19140625,00	645,88	12362,55	14984,90
2	12679065,83	639,11	8103,34	9882,12
3	18218322,43	567,18	10333,08	12678,62
4	15645112,70	605,09	9466,77	12294,51
5	14792899,41	535,05	7914,89	9741,40
6	15602500,00	683,64	10666,52	10666,52
7	14802506,75	556,13	8232,07	9628,15
8	18413365,95	534,75	9846,56	11001,74
9	15212680,53	758,24	11534,91	11198,95
10	21080459,50	522,72	11019,28	14190,96
11	6925207,76	596,00	4127,43	5159,29
12	12401910,36	550,12	6822,55	8528,18
13	14223673,47	814,00	11578,02	11814,31
14	15101076,54	652,81	9858,17	11449,67
15	18589844,57	623,10	11583,34	14965,55
16	17118301,36	706,30	12090,66	13486,52
17	13092970,91	627,66	8217,89	10021,82

Tabla 9: Módulo de elasticidad dinámico al 30%.

5.6 Cálculo del módulo de elasticidad estático (MOE)

De acuerdo a la metodología, el MOE estático a flexión se ha obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$E = \frac{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3}{6 \cdot \pi \cdot r^4 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)}$$



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Los resultados obtenidos son los expuestos en la tabla siguiente:

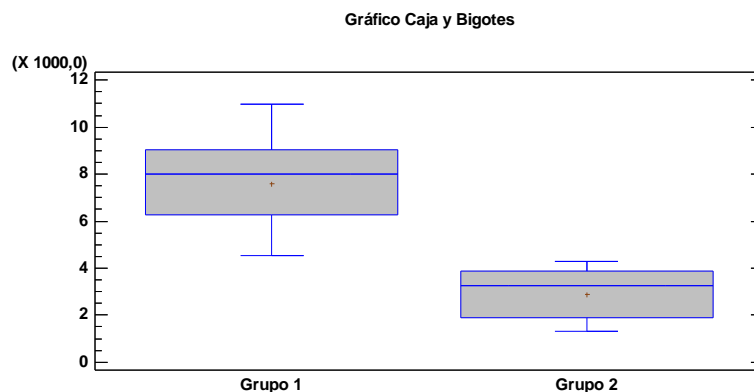
Rama	MOE (N/mm ²)	Grupo
1	1321,38	2
2	4518,88	1
3	2110,14	2
4	1892,62	2
5	5028,61	1
6	9053,05	1
7	9383,88	1
8	10982,68	1
9	6698,70	1
10	3622,73	2
11	3233,64	2
12	6287,76	1
13	8383,34	1
14	4272,09	2
16	3858,59	2
17	8020,37	1

Tabla 10: Resultados del MOE con el ensayo a flexión.

En la tabla se observa que no aparece el MOE de la rama nº 15, esto es debido a que la máquina de ensayo no pudo alcanzar la carga suficiente para producir la rotura y completar el ensayo. Por ese motivo y de cara a los posteriores análisis no se ha tenido en cuenta esta pieza.

La gráfica que se muestra a continuación, refleja que las ramas pertenecientes al Grupo 1 (ramas finas 2, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13 y 17) tienen un MOE sensiblemente más elevado que las del Grupo 2 (ramas gruesas 1, 3, 4, 10, 11, 14 y 16). Esto quiere decir que las ramas de mayor diámetro son más flexibles que las ramas de menor diámetro. Probablemente, una parte de esta diferencia se deba a la diferente influencia del cortante en cada grupo, aunque con los datos disponibles no ha sido posible determinarlo. No obstante, la diferente morfología de ambos grupos de ramas puede ser la causante de un comportamiento mecánico diferente.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 7: Comparación del MOE a flexión del grupo 1 y 2.

Análisis de los resultados:

Grupo 1:

- Un total de 9 muestras que varían entre el valor del MOE 4518,88 N/mm² hasta el 10982,7 N/mm²
- Con un valor medio del MOE de 7595,25 N/mm².
- Coeficiente de variación del 28%

Grupo 2:

- Un total de 8 muestras que varían entre el valor del MOE 1321,38 N/mm² hasta el 4272,09 N/mm²
- Con un valor medio del MOE de 2901,6N/mm².
- Coeficiente de variación del 38,7%

5.7 Cálculo de la resistencia (MOR)

El módulo de rotura (MOR) o resistencia se define como la tensión máxima que una probeta de madera puede soportar en el ensayo a flexión antes de la rotura, expresado en N/mm². El cálculo del MOR se realiza a partir de lo expuesto en la metodología.

En los ensayos de resistencia a flexión que se analizan en este proyecto se ha observado que las probetas tienden a fallar por el borde inferior traccionado como consecuencia de la presencia de nudos.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Los resultados obtenidos, son lo que se muestran en la tabla:

Nº Rama	Drot (mm)	Wrot (mm ³)	Prot (kN)	a (mm)	MOR (N/mm ²)	H (%)
1	102,5	105723,49	34,37	140	22,76	65
2	57	18181,28	4,53	290	36,13	66
3	91,75	75825,994	28,829	140	26,61	67
4	84,75	59761,159	30,026	140	35,17	76
5	51,6	13488,045	3,14	290	33,76	67,5
6	37,45	5156,504	2,28	290	64,11	30
7	37,5	5177,1852	0,6096	290	17,07	59
8	44,575	8695,0874	3,6959	290	61,63	51
10	86	62444,652	26,134	140	29,30	74,7
11	84	58188,579	12,492	140	15,03	70
12	49,725	12070,472	2,632	290	31,62	70
13	46,9	10127,877	3,771	290	53,99	34
14	79,5	49328,883	21,94	140	31,13	57,8
16	74,7	40922,457	25,629	140	43,84	50,7
17	55,55	16828,759	4,57	290	39,38	66

Tabla 11: El módulo de rotura de las ramas.

Donde:

Drot diámetro medio de la rama en la sección de rotura, en mm.

Wrot módulo resistente de la sección de rotura, en mm³.

Prot carga de rotura, en KN.

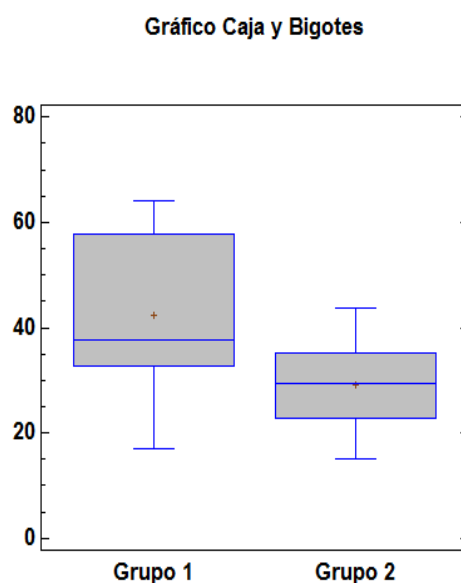
a distancia entre el apoyo y el punto de aplicación de la carga, en mm (Grupo 2 a = 140 mm; Grupo 1 a = 290 mm).

MOR resistencia, tensión de rotura o módulo de rotura, en N/mm².

H contenido de humedad de la rama, en %.

Además en la tabla se puede observar que no aparecen ni la rama nº9 ni la rama nº 15, debido que estas ramas no llegaron a romper en el ensayo a flexión. La rama nº15 soportó sin romperse la máxima carga posible de la célula de carga. La rama 9 no llegó a romperse al alcanzar la máxima deformación posible según la disposición del ensayo.

Para que los resultados sean más visibles y se pueda comparar mejor el grupo 1 con el grupo 2, se muestra a continuación la gráfica de Cajas y Bigotes.



Gráfica 8: Comparación del MOR entre el grupo 1 y el grupo 2.

De la gráfica se deduce, que el grupo 1 generalmente alcanza valores más elevados de tensión de rotura (MOR). Es decir soportan más tensión antes de que se produzca la rotura de la rama.

Para poder entender mejor la gráfica se muestran a continuación los datos estadísticos obtenidos:

Grupo 1:

- Un total de 8 muestras que varían entre el valor del MOR 17,07 N/mm² hasta el 64,11N/mm²
- Con un valor medio del MOR de 42,21 N/mm².
- Coeficiente de variación del 16,28%.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Grupo 2:

- Un total de 7 muestras que varían entre el valor del MOR 15,02 N/mm² hasta el 43,83 N/mm²
- Con un valor medio del MOR del 29,12 N/mm².
- Coeficiente de variación del 9,15%



Imagen 28: Ensayo a flexión de las ramas.

En la imagen 30 se observa que la rama nº 9 perteneciente al grupo 1 (ramas finas), tiene gran flexibilidad, deformándose bajo carga respecto a su estado inicial.

5.8 Relación entre diámetro y longitud en la rama

Se ha realizado un análisis de la variación del diámetro a lo largo de la rama. La relación diámetro-longitud de rama expresada por los autores Patrick, C. y Mortier, P. (1991) citada anteriormente es:



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

$$D = a \cdot L^b$$

Donde a y b son parámetros.

b = 1 cuando el diámetro varia proporcionalmente al crecimiento en longitud (Bertram, 1989).

b = 0,5 cuando existe un estrés máximo permanente en la rama (Mc-Mahon., Kronauer 1976).

En el proyecto se ha considerado que el diámetro varia proporcionalmente al crecimiento en longitud y que no existen causas de estrés, asique el valor que se le ha dado al parámetro b es 1.

Primero se ha analizado la relación entre ramas individuales para conocer si el coeficiente de determinación es bueno y establecer que existe una correlación entre ambas variables. Después se han juntado cinco ramas para calcular un parámetro medio "a" y aproximado para las ramas objeto de estudio.

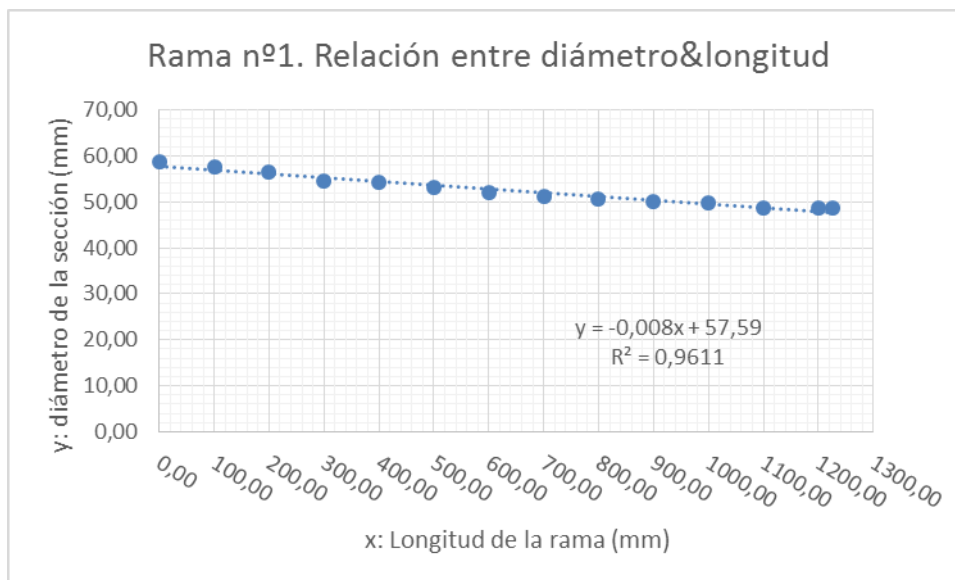
Para el análisis individual se muestran como ejemplo las tablas y gráficas de las ramas nº1 (como ejemplo de rama con pocas desviaciones) y nº 7 (como ejemplo de rama más irregular).

Rama 1		Rama 7
Longitud	Diámetro	Diámetro
0,00	58,63	39,00
100,00	57,50	41,95
200,00	56,38	39,40
300,00	54,38	37,85
400,00	54,13	38,15
500,00	53,13	36,85
600,00	52,00	36,25
700,00	51,13	36,85
800,00	50,63	37,15
900,00	50,13	30,45
1000,00	49,75	31,25
1100,00	48,75	29,10

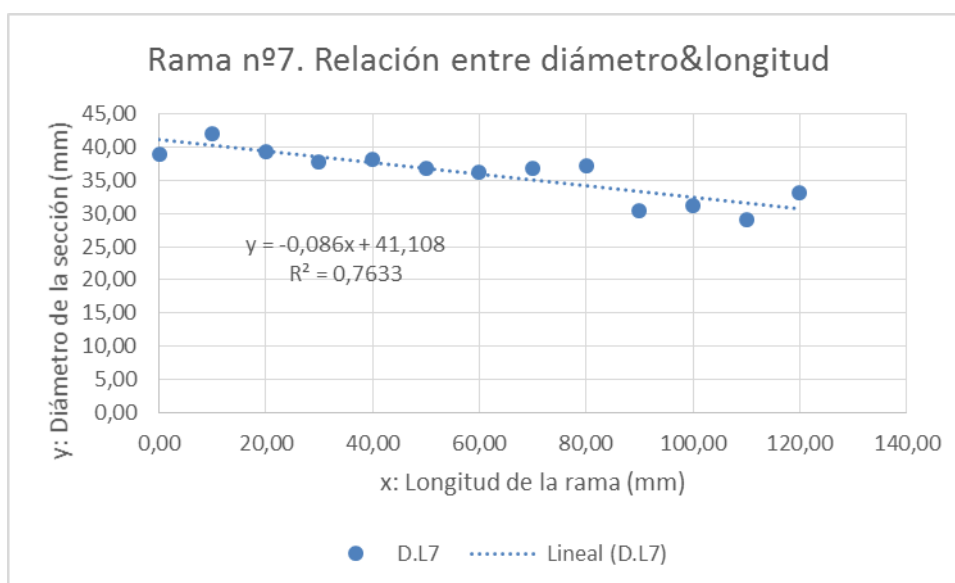
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

1200,00	48,75	33,10
1225,00	48,60	

Tabla 12: Diámetros a lo largo de la rama nº 1 y nº 7.



Gráfica 9: Línea de tendencia de la relación diámetro-longitud de la rama 1.



Gráfica 10: Línea de tendencia de la relación diámetro-longitud de la rama 7.

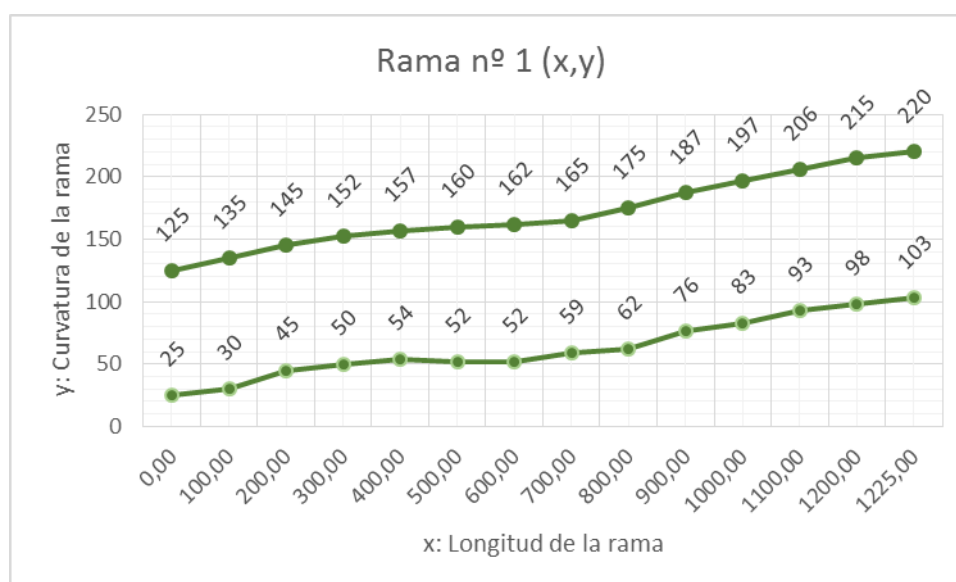
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

En ellas se observa que existe un coeficiente de determinación (R^2) bastante aceptable, significando una buena aproximación entre ambas variables. Por ello se puede suponer un patrón de crecimiento lineal, de manera que el diámetro disminuye linealmente a medida que se recorre la rama en longitud.

En la imagen siguiente (Imagen 29) se observa la rama 1 con más detalle y su representación en el plano XY (Gráfica 11) en la que se aprecian las curvaturas, los defectos y la variación del diámetro a lo largo de su longitud.



Imagen 29: Fotografía rama nº1.



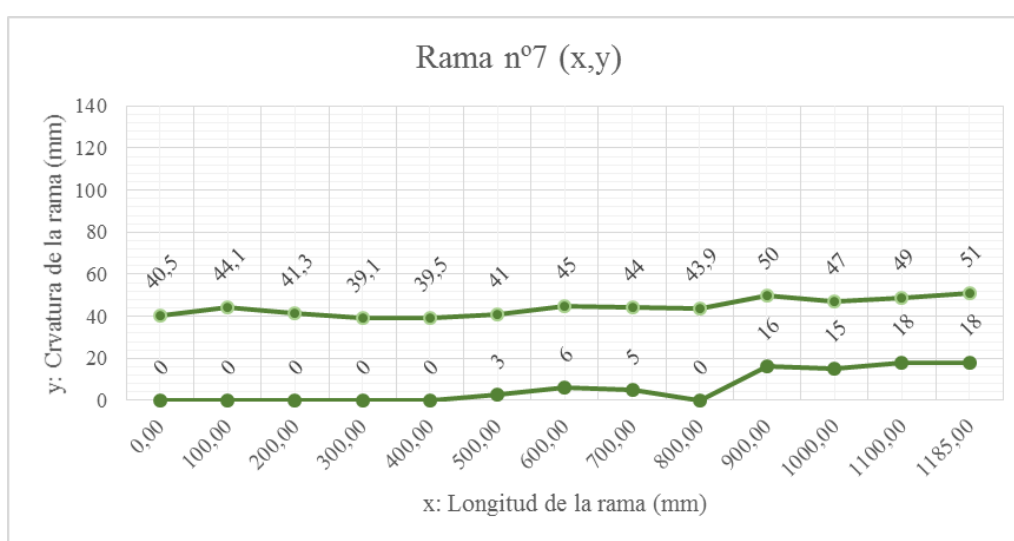
Gráfica 11: Curvatura de la rama 1 a lo largo de su longitud. Plano (x,y).

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Del mismo modo, en la Imagen 30 y en la Gráfica 12 se observan las curvaturas, los defectos y la variación del diámetro a lo largo de su longitud para la rama 7.



Imagen 30: Fotografía rama nº7.

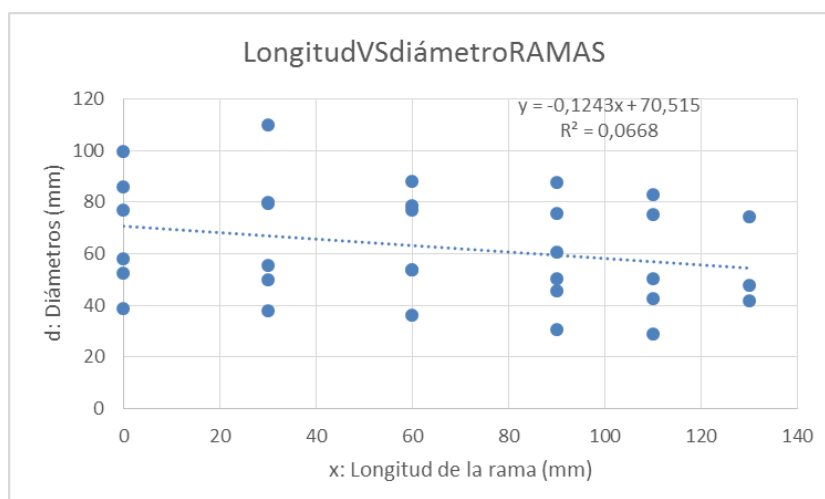


Gráfica 12: Curvatura de la rama 7 a lo largo de su longitud. Plano (x,y).

Para el conjunto de las ramas, se ha llevado a cabo este análisis a las ramas 4, 7, 11, 13, 14 y 17, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) por encima del 0,60, por lo que la buena relación entre ambas variables se puede extender al conjunto de la muestra.

Sin embargo, si se hace una regresión que busque la relación entre diámetro y longitud con las mismas ramas simultáneamente y obtener el parámetro “a” de nuestras ramas, se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) muy bajo para un valor de $a = -0.1243$. En general se observa en la gráfica que a medida que se está más lejos del fuste, el diámetro medio de las ramas disminuye. Este aspecto se puede observar en la Gráfica 13.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 13: Relación D=a. L^b de las ramas.

5.9 Relación entre densidad y penetración con pilodyn

Se ha llevado a cabo un estudio de la relación entre la densidad de las ramas y la profundidad de penetración con Pilodyn en las ramas. Los resultados obtenidos son los siguientes (ramas marcadas de color verde claro indican que pertenecen al grupo 2, ramas gruesas):

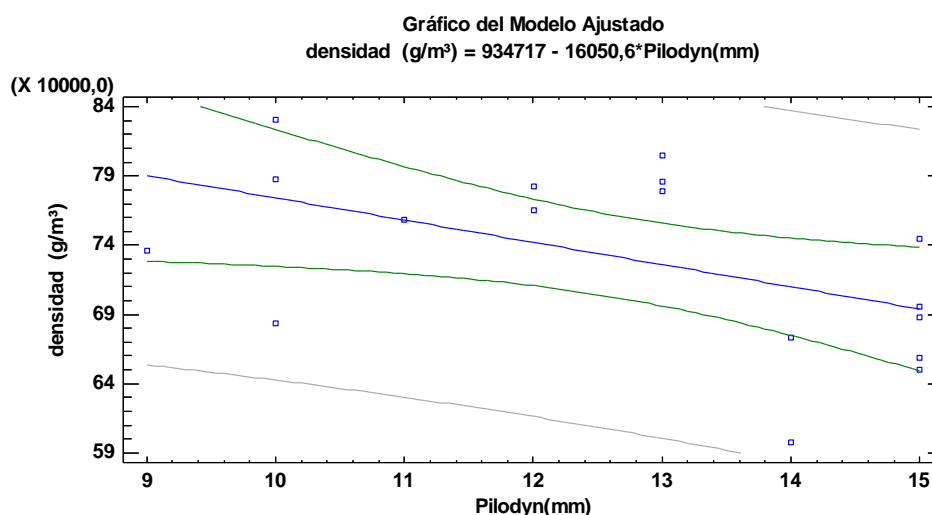
Rama	Pilodyn (mm)	densidad (kg/m ³)	H (%)
1	12	782,88	65,00
2	13	779,40	66,00
3	15	695,93	67,00
4	13	785,84	76,00
5	15	658,52	67,50
6	10	683,64	30,00
7	15	650,44	59,00
8	14	597,49	51,00
9	9	736,16	24,00
10	14	673,18	74,70
11	15	745,00	70,00

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

12	15	687,65	70,00
13	10	830,61	34,00
14	11	758,20	57,80
15	13	805,04	75,20
16	10	787,84	50,70
17	12	765,44	66,00

Tabla 13: Mediciones de propiedades físicas en la madera.

La relación entre ambas variables se expresa mediante el siguiente gráfico de regresión (Gráfica 14).



Gráfica 14: Relación que existe entre la densidad de cada probeta con la penetración del pilodyn.

La gráfica muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación que existe entre la densidad (g/m³) y la penetración con pilodyn (mm). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Densidad (g/m}^3\text{)} = 934717 - 16050,6 * \text{Pilodyn (mm)}$$

Esta relación ofrece un coeficiente de determinación de 0,2669.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

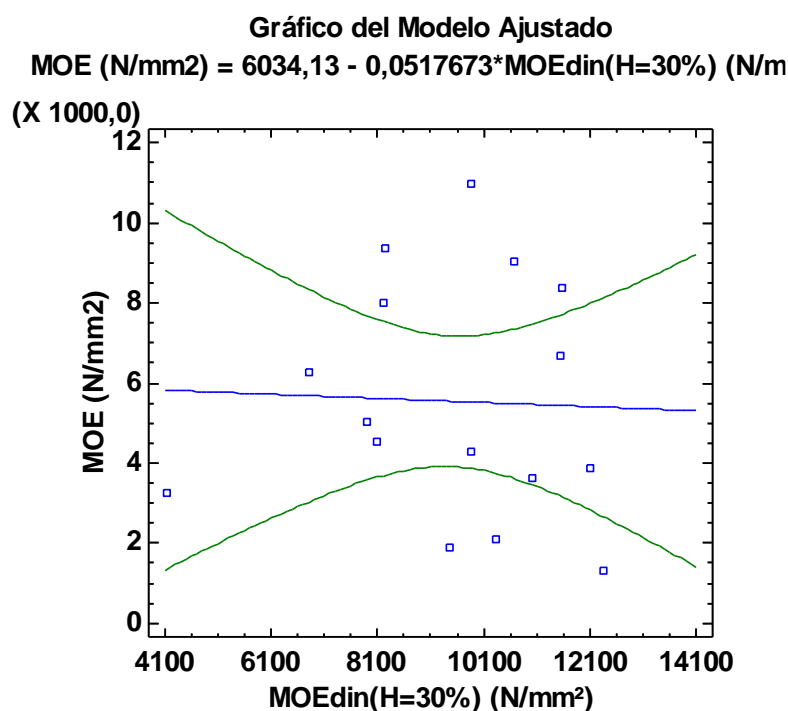
5.10 Relación entre MOE dinámico y MOE estático

Ahora se analiza la correlación que existe entre el MOE dinámico corregido al contenido de humedad del 30 % y el MOE estático a flexión.

Rama	MOE estático (N/mm ²)	MOEdin (H=30%) (N/mm ²)
1	1321,38	12362,55
2	4518,88	8103,34
3	2110,14	10333,08
4	1892,62	9466,77
5	5028,61	7914,89
6	9053,05	10666,52
7	9383,88	8232,07
8	10982,68	9846,56
9	6698,70	11534,91
10	3622,73	11019,28
11	3233,64	4127,43
12	6287,76	6822,55
13	8383,34	11578,02
14	4272,09	9858,17
16	3858,59	12090,66
17	8020,37	8217,89

Tabla 14: MOE dinámico y MOE flexión.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 15: Regresión simple entre el MOE dinámico y el MOE flexión.

La gráfica muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación que existe entre el MOE dinámico (N/mm²) y el MOE estático a flexión (N/mm²). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{MOE (N/mm}^2\text{)} = 6034,13 - 0,0517673 * \text{MOEdin(H=30\%)} \text{ (N/mm}^2\text{)}.$$

El valor-P de la tabla ANOVA (valor-P = 0,887) es mayor a 0,05, por lo que no se ha encontrado una relación estadísticamente significativa entre MOE a flexión (N/mm²) y MOE dinámico (H=30%) (N/mm²) con un nivel de confianza del 95,0% ó más. El coeficiente de determinación (R^2) es 0,0014. Estos valores están muy alejados a los esperados de un estudio de este tipo y su análisis requiere un estudio detallado que podrá abordarse en etapas posteriores del proyecto.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

5.11 Relación entre MOE dinámico y velocidad de onda

Dada la escasa relación obtenida entre MOE dinámico y MOE estático, se ha analizado la relación entre el módulo de elasticidad dinámico y la velocidad de propagación de la onda calculada a partir del Microsecond Timer.

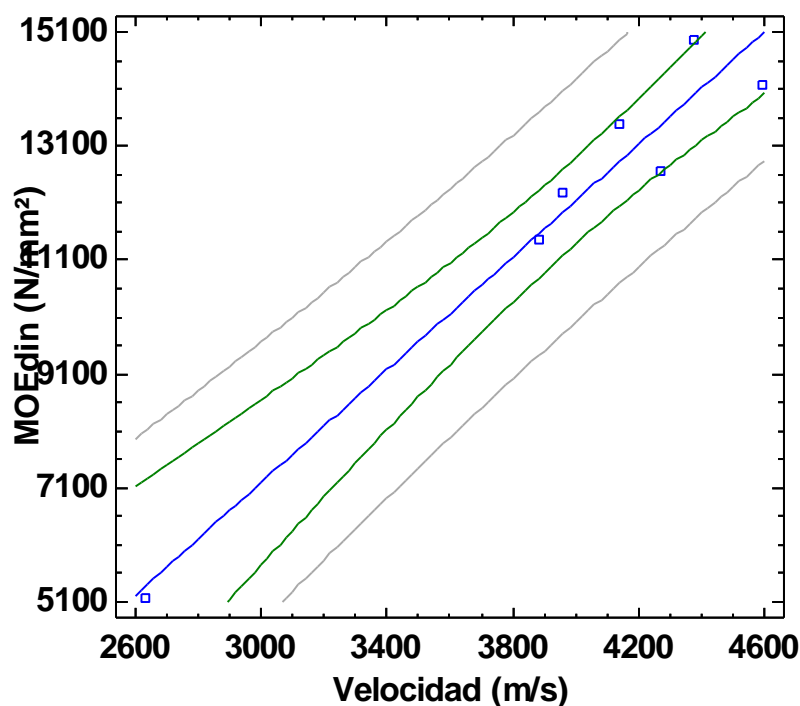
Para obtener estos resultados de una forma más clara, se va estudiar esta relación en cada grupo de ramas.

A continuación se muestran las tablas de cada grupo y su correspondiente gráfica de regresión simple.

Grupo 2			Grupo 1		
Rama	MOEdin (N/mm ²)	Velocidad (m/s)	Rama	MOE din (N/mm ²)	Velocidad (m/s)
1	14984,90	4375,00	2	9882,12	3560,77
3	12678,62	4268,29	5	9741,40	3846,15
4	12294,51	3955,39	6	10666,52	3950,00
10	14190,96	4591,35	7	9628,15	3847,40
11	5159,29	2631,58	8	11001,74	4291,08
14	11449,67	3886,01	9	11198,95	3900,34
16	13486,52	4137,43	12	8528,18	3521,63
			13	11814,31	3771,43
			17	10021,82	3618,42

Tabla 15: Valores de MOE dinámico y velocidad de propagación de la onda.

Gráfico del Modelo Ajustado
MOEdin (N/mm²) = -7678,08 + 4,95567*Velocidad (m/s)



Gráfica 16: Regresión simple entre MOE dinámico y velocidad de propagación de la onda del grupo 2.

La gráfica muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación que existe entre el MOE dinámico (N/mm²) y la velocidad de propagación de la onda (m/s). La ecuación del modelo ajustado es:

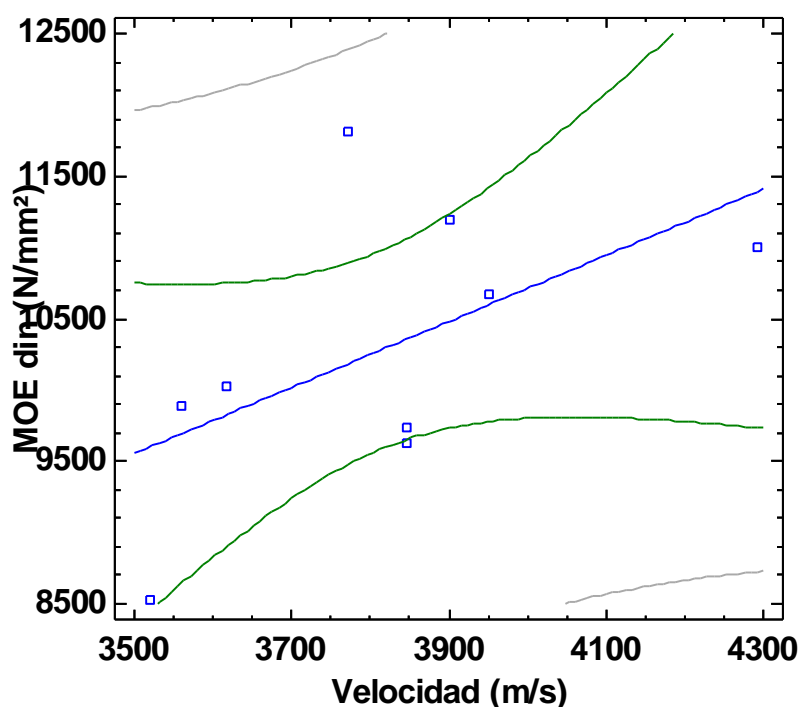
$$\text{MOEdin (N/mm}^2\text{)} = -7678,08 + 4,95567 \cdot \text{Velocidad (m/s)}$$

El valor-P de la tabla ANOVA (valor-P = 0,0002) es menor a 0,05, por lo que sí se ha encontrado una relación estadísticamente significativa entre MOE dinámico (N/mm²) y la velocidad de propagación (m/s) con un nivel de confianza del 95,0%. El coeficiente de determinación (R²) es 0,95, bastante próximo a 1 y expresa una relación estadísticamente fuerte.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

A continuación se muestra la gráfica del grupo 1.

Gráfico del Modelo Ajustado
MOE din (N/mm²) = 1415,08 + 2,32451*Velocidad (m/s)



Gráfica 17: Regresión simple entre MOE dinámico y velocidad de propagación de la onda en el grupo 1.

La gráfica muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación que existe entre el MOE dinámico (N/mm²) y la velocidad de propagación de la onda (m/s). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{MOE din (N/mm}^2\text{)} = 1415,08 + 2,32451 \cdot \text{Velocidad (m/s)}$$

El valor-P de la tabla ANOVA (valor-P = 0,1228) es mayor a 0,05, por lo que no se ha encontrado una relación estadísticamente significativa entre MOE dinámico (N/mm²) y la velocidad de propagación (m/s) del grupo 1, con un nivel de confianza del 95,0%. El coeficiente de determinación (R^2) es 0,3054, indicando una relación moderadamente entre las variables.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

5.12 Relación entre el MOR y la velocidad de propagación de la onda.

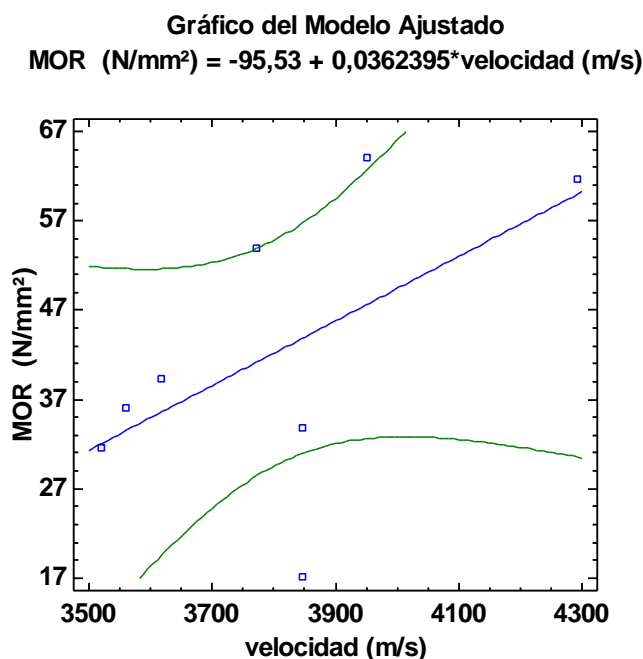
Se ha analizado la relación entre el módulo de rotura y la velocidad de propagación de la onda calculada a partir del Microsecond Timer.

Para obtener estos resultados de una forma más clara, se va estudiar esta relación en cada grupo de ramas.

A continuación se muestran las tablas de cada grupo y su correspondiente gráfica de regresión simple.

Grupo 1			Grupo 2		
	MOR (N/mm ²)	velocidad (m/s)		MOR (N/mm ²)	velocidad (m/s)
2	36,13	3560,77	1	22,76	4375,00
5	33,76	3846,15	3	26,61	4268,29
6	64,11	3950,00	4	35,17	3955,39
7	17,07	3847,40	10	29,30	4591,35
8	61,63	4291,08	11	15,03	2631,58
12	31,62	3521,63	14	31,13	3886,01
13	53,99	3771,43	16	43,84	4137,43
17	39,38	3618,42			

Tabla 16: Valores de MOR y velocidad de propagación de la onda.



Gráfica 18: Regresión simple entre MOR y velocidad de propagación de la onda en el grupo 1.



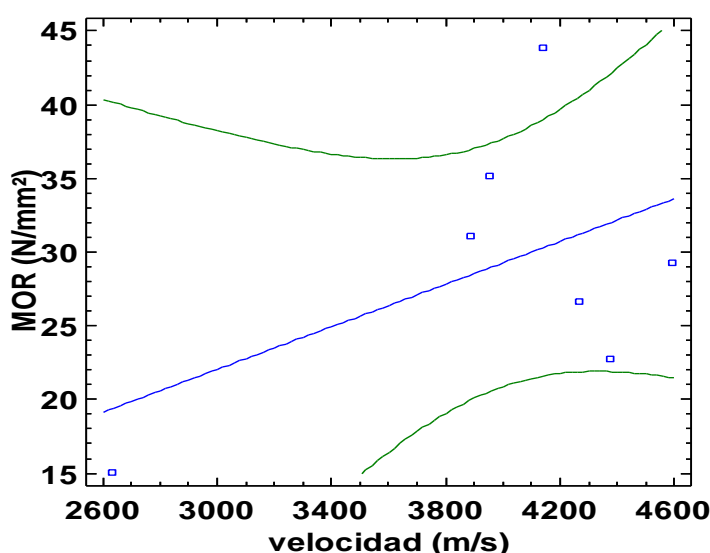
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

La gráfica muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación que existe entre el MOR (N/mm²) y la velocidad de propagación de la onda (m/s). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{MOR (N/mm}^2\text{)} = -95,53 + 0,0362395 \cdot \text{velocidad (m/s)}$$

El valor-P de la tabla ANOVA (valor-P = 0,1526) es mayor a 0,05, por lo que no se ha encontrado una relación estadísticamente significativa entre MOR (N/mm²) y la velocidad de propagación (m/s) del grupo 1, con un nivel de confianza del 95,0%. El coeficiente de determinación (R^2) es 0,308, indicando una relación buena entre las variables.

Gráfico del Modelo Ajustado
MOR (N/mm²) = 0,313546 + 0,00724169*velocidad (m/s)



Gráfica 19: Recta de regresión entre el MOR y la velocidad de propagación del grupo 2.

La gráfica muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación que existe entre el MOR (N/mm²) y la velocidad de propagación de la onda (m/s). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{MOR (N/mm}^2\text{)} = 0,313546 + 0,00724169 \cdot \text{velocidad (m/s)}.$$



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

El valor-P de la tabla ANOVA (valor-P = 0,2453) es mayor a 0,05, por lo que no se ha encontrado una relación estadísticamente significativa entre MOR (N/mm²) y la velocidad de propagación (m/s) del grupo 2, con un nivel de confianza del 95,0%. El coeficiente de determinación (R^2) es 0,2572, indicando una relación moderada entre las variables

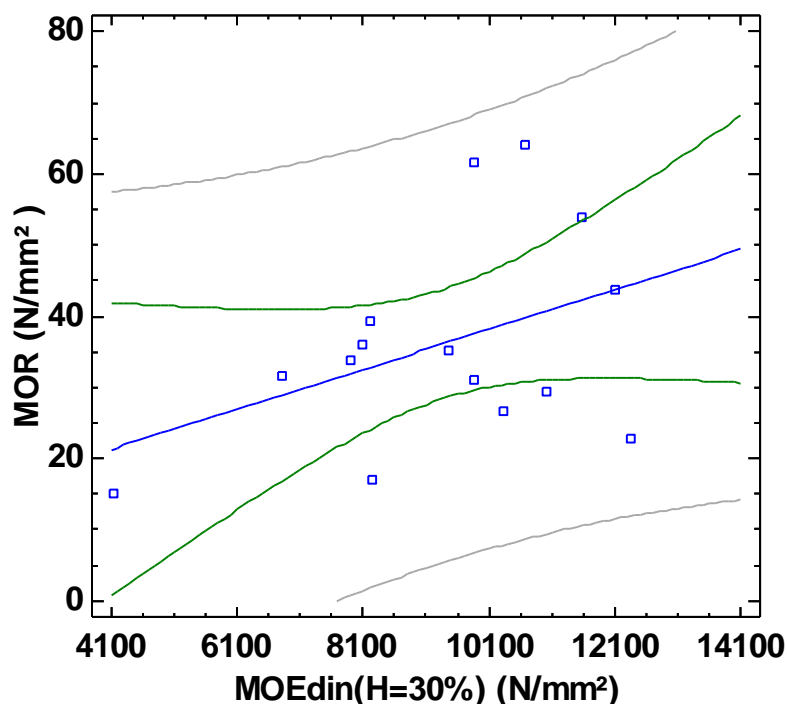
5.13 Relación entre MOR vs MOE dinámico.

Finalmente se ha estudiado la posible relación que existe entre el módulo de rotura y el módulo de elasticidad dinámico. Para ello se expone primero una tabla para conocer sus valores y a continuación la gráfica de regresión simple.

Rama	MOR (N/mm ²)	MOEdin (N/mm ²)	MOEdin(H=30%) (N/mm ²)
1	22,76	14984,90	12362,55
2	36,13	9882,12	8103,34
3	26,61	12678,62	10333,08
4	35,17	12294,51	9466,77
5	33,76	9741,40	7914,89
6	64,11	10666,52	10666,52
7	17,07	9628,15	8232,07
8	61,63	11001,74	9846,56
10	29,30	14190,96	11019,28
11	15,03	5159,29	4127,43
12	31,62	8528,18	6822,55
13	53,99	11814,31	11578,02
14	31,13	11449,67	9858,17
16	43,84	13486,52	12090,66
17	39,38	10021,82	8217,89

Tabla 17: Valores del MOE dinámico y MOR.

Gráfico del Modelo Ajustado
MOR (N/mm²) = 9,73811 + 0,00281181*MOEdin(H=30%) (N/mm²)



Gráfica 20: Relación que existe entre e MOR y el MOE dinámico en el PSF.

La gráfica muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación que existe entre el MOE dinámico (N/mm²) y el MOR (N/mm²). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{MOR (N/mm}^2\text{)} = 9,73811 + 0,00281181 * \text{MOEdin(H=30\%)} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

El valor-P de la tabla ANOVA (valor-P= 0,117), es mayor a 0,05 por lo que no es posible establecer una relación estadísticamente significativa entre MOR (N/mm²) y MOE dinámico (N/mm²) con un nivel de confianza del 95,0%. Además el coeficiente de correlación es 0,421, que significa que existe una relación débil entre ambas variables.

En este caso se obtiene una relación sensiblemente mejor que con el MOE estático.



6. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo un análisis de 17 ramas para estudiar su morfología y determinar sus propiedades físicas mecánicas mediante ensayos.

Como conclusiones particulares se señalan las siguientes:

- Por su morfología se ha observado que existen dos tipos de ramas: Grupo 1 (ramas finas o cuyo diámetro medio es inferior a 69 mm) y Grupo 2 (ramas gruesas cuyo diámetro medio es superior a 69 mm). En cuanto a su morfología las ramas del grupo 2 tienen mayor número de nudos. En cuanto a sus propiedades físicas no se han observado diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos, aunque en el Grupo 2 se observan valores de contenido de humedad y de densidad ligeramente superiores. En cuanto a sus propiedades mecánicas se ha observado una diferencia significativa en cuando a módulo de elasticidad y resistencia, resultado que las ramas gruesas (ramas del Grupo 2) tienen un MOE y un MOR más bajos.
- Respecto al crecimiento de la rama en longitud y diámetro, se ha observado una relación clara entre la longitud de las ramas y su diámetro en cada sección, aunque no se ha podido obtener una relación clara de acuerdo a las propuestas de otros autores.
- En el ensayo a flexión con la máquina universal y célula de carga de 60 kN, algunas ramas del Grupo nº 2 (diámetros medios >69 mm) no alcanzaron la rotura. De dicho ensayo, se puede concluir que para ramas con diámetros medios comprendidos entre 69 y 128 mm y con longitud media de 1,18 m se pueden alcanzar carga medias de rotura de 30 kN. Para ramas con diámetros medios comprendidos entre 34 y 69 mm y con longitud media de 1,35 m son capaces de resistir una carga media de 4,45 kN.
- La utilización de técnicas no destructivas para la estimación de propiedades físicas y mecánicas, contrastadas en madera seca, no ha dado como resultado relaciones estadísticamente significativas.
- La relación entre densidad y pilodyn mediante regresión lineal proporciona un coeficiente de determinación $R^2 = 0,26$, lo que permite establecer una correlación entre ambas variables.
- Entre el MOE dinámico y el MOE estático a flexión sólo se ha obtenido un coeficiente de determinación (R^2) de 0,0014 para la regresión simple. En cambio, la relación



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

directa entre velocidad de propagación de onda y el MOE dinámico resulta estadísticamente significativa, especialmente en el grupo de ramas gruesas (grupo 2).

- La relación estudiada entre el MOR y la velocidad de propagación, ha proporcionado un coeficiente de determinación en el grupo 1 de 0,308 y en el grupo 2 un 0,257, significándose que existe una relación moderada entre ambas variables.
- La relación estudiada entre MOE dinámico al 30 % de humedad y el MOR, ha proporcionado un coeficiente de determinación del 0,1775, significándose que existe relación estadística relativamente débil entre ambas variables.

Como conclusiones generales, a la vista de los resultados, señalan las siguientes:

- Se trata del primer estudio biomecánico de ramas del Hayedo de Montejo de la Sierra, por lo que debe entenderse en cierto modo como un estudio de aproximación que no permite alcanzar unas conclusiones contundentes. Este estudio debe ser completado en el futuro con un mayor número de ensayos.
- La metodología se ha revelado como válida en general en cuanto a la medición y caracterización de las ramas. Debe mejorarse la toma de datos y el ajuste de parámetros como los correspondientes al contenido de humedad, proponiendo su medición en estufa de modo más preciso y el ajuste a través de factores específicos para cada variable: densidad, velocidad de propagación de una onda, etc.
- Se ha revelado una diferencia significativa entre dos tipos de ramas según su morfología: ramas finas (en general ramas más jóvenes, probablemente con más madera juvenil) y ramas gruesas (en general ramas más maduras). Esta circunstancia podría obligar a centrar el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de acuerdo a los elementos que se quiera analizar: troncos, ramas o ramillas.



7. BIBLIOGRAFÍA

- Archer R.R., 1987. Growth Stresses and Strains in Trees. Forest Product Abstract, Vol 10 nº 3, p.74
- Bobadilla I. 2014. Apuntes de Métodos no destructivos. SIGCCPF.
- Bertram J., 1989. Size dependent differential scaling in branches: the mechanical design of trees revisited.
- Bonenfant, M., 1985 Croissance et qualite du chataignier de futaie en Bretagne. Ed. Serfob Bretagne, Memoire troisieme annee. Enitef, Rennes Cedex, Francia, 123 p.
- Brudi, E., 2001. Conferencia sobre biomecánica de la ISA, Savannah
- Cannell, MR., Morgan, J., Murray, MB. 1988. Support costs of different branch design: effect of position, number, angle and deflection of laterals.
- Castera, P., Mortier, V. 1991. Growth patterns and bending mechanics of branches
- Coder, K.D., 2000. Estimating wind forces on tree crowns. The University of Georgia.
- Coder, K.D., 2000. New growth increments sustain stem strength. The University of Georgia.
- Coder, K.D., 2000. Open cavity impact on stem strength. The University of Georgia.
- Coder, K.D., 2000. Strength of Solid tree stems. The University of Georgia.
- Coder, K.D., 2000. Tree strength & cross-sectional area. The University of Georgia.
- Cuevas, E. 2003. Propiedades físicas y mecánicas de la madera. Material de apoyo en propiedades físicas y mecánicas. Universidad de Talca, Chile.
- García, L., Guideo, A., Pereza, C., de Palacios, P. 2003. La Madera y su anatomía: anomalías y defectos, estructura microscópica de coníferas y frondosas, identificación de maderas, descripción de especies y pared celular.
- Gil, L. 2010. Anatomía vegetal aplicada a las especies forestales. Madrid: Fundación Conde Del Valle De Salazar.
- Gil, L., Alonso, J., Aranda, I., González, I., Gonzalo, J., López, U., Millerón, M., Nanos, N., Perea, R., Rodríguez, J., Valbuena, M. Ed. 2010. El Hayedo de



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Montejo Una gestión sostenible. Comunidad de Madrid. ISBN: 978-84-451-3218-0.

- Gil Cañas, M.C. 2011. Influencia del tamaño y la calidad de la pieza en la estimación de las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus sylvestris* para uso estructural mediante técnicas no destructivas. Proyecto fin de carrera. E.T.S.I Montes. Universidad politécnica de Madrid.
- Arriaga, F., Gonzalez, M.A., Medina, G., Ortiz, J., Peraza, F. y Touza, M.C., 1994. Guía de la madera. AITIM. ISBN 84-87381-07-3.
- Gómez, F., Morla, C., Maldonado, F. 2010. Botánica, Dendrología y Geobotanica.
- Izquierdo, S.T., 2015 Influencia del contenido de humedad en la estimación de las propiedades mecánicas de la madera de pino laricio (*Pinus nigra* arn. Ssp. *Salzmannii*) mediante técnicas no destructivas. Proyecto fin de carrera E.T.S.I Montes. Universidad politécnica de Madrid.
- Mahon, Mc., Kronauer, R.E. 1976. Tree structures: deducing the principle of mechanical design.
- Montoya, J.M., 1988. La poda de los árboles forestales. Ed.Mundi-Prensa.
- Peraza, C., Guindeo, A., García, L., Laín L., 1993. Tecnología de la Madera. BLOQUE V.
- Pérez García, A. (2012) Estimación de parámetros de calidad sobre tableros derivados de la madera a partir de ensayos no destructivos. Proyecto fin de carrera. E.U.I.T forestal. Universidad politécnica de Madrid.
- Pérez, V. 1983. Manual de propiedades físicas y mecánicas de maderas chilenas.
- Schaeffer B. 1991. Forme d'équilibre d'une branche d'arbre.
- S.H.E. Parker., Simplified Mechanisms of Strength of Materials. rev. Ed. 1961
- Vignote, S., Martinez-Rojas, I., Villasante, A. 2013. Silvicultura y calidad de la madera. Recuperado de: www.researchgate.net.
- Wainwright. S.A., Biggs, W. D., Currey, J.D., Gosline, J.M. 1976. Mechanical design in organisms. Edward Arnold (publishers) Limited.



8. ANEXO I: RESUMEN DEL PLAN DE TRABAJO

El estudio de las propiedades físicas y mecánicas de las ramas de haya provenientes del Hayedo de Montejo de la Sierra, se ha realizado a partir de unas fases coordinadas entre sí, que a continuación se exponen y se describen:

- 1º Una visita a campo, para conocer el entorno del Hayedo de Montejo y su vegetación, en especial las hayas. Duración, 1 día.
- 2º Comienzo en la documentación del Hayedo de Montejo, para contextualizar las hayas. Duración, ½ día.
- 3º Segunda visita al hayedo. Levantamiento de un haya centenario a través del Lídar SCENNE, para modelizar un árbol desde el punto de vista mecánico en continuaciones de este presente proyecto. El aparato barría el árbol y sus alrededores, a través de una panorámica de la que se obtiene millones de nubes de puntos que son las coordenadas de cada cosa presente en la panorámica. Además en esta visita se recogieron muestras de ramas de hayas representativas del hayedo para llevarlas al laboratorio. Duración, 1 día.
- 4º Documentación del material que se va utilizar para obtener las propiedades físicas y mecánicas de las ramas recogidas. Duración, ½ día.
- 5º Trabajo en laboratorio durante 1 semana, para medir las ramas, pesarlas y obtener propiedades físicas con el Pilodyn, Microsecond Timer y Xilohigrómetro. Además, se clasificaron las ramas en dos grupos según diámetro y longitud de las ramas. Duración, 5 días.
- 6º Realización de gráficas, tablas, cálculos y desarrollo de los antecedentes del proyecto. Pasar a ordenador todos los estadillos y notas de las ramas, esto incluye: las medidas de longitud de las ramas y diámetro de cada sección de las ramas, las coordenadas de las ramas, los resultaos obtenidos del Pilodyn, Microsecond Timer, y Xilohigrómetro; calcular la densidad de las ramas, el módulo de elasticidad dinámico, etc. Después su redacción en el proyecto. Duración, 10 días.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

- 7º Trabajo en laboratorio durante una semana para realizar los ensayos a flexión. Esto consiste en el estudio de cómo preparar la máquina para realizar dichos ensayos y posteriormente su preparación. Para el grupo nº 1, la preparación de la máquina universal fue siguiendo las indicaciones de la norma UNE EN 408. Sin embargo, para las ramas del grupo 2, se cambió la luz como también la separación entre las cargas. Duración, 4 días.
- 8º Desarrollo del proyecto escrito. Incluye, estudio y búsqueda de información de todas las variables que se incluyen en el proyecto, como la elaboración de tablas y gráficas con Excel y STATGRAPHICS, haciendo análisis estadísticos y estudiando posibles relaciones entre las variables calculadas. Además del análisis de los caso atípicos y búsqueda de solución. Duración, 15 días.

La elaboración de este proyecto introductorio del estudio mecánico de las hayas del Hayedo de Montejo de la Sierra, tiene un presupuesto de 17.521,1 €.

A continuación se muestra un cronograma del plan de trabajo.





Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

9. ANEXO II: PRESUPUESTO DEL PROYECTO

El desarrollo de este presente proyecto conlleva un presupuesto que se muestra a continuación.

MATERIALES	PRECIO POR UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO TOTAL(€)
Fléxometro	19.65	3	58,95
Pilodyn 6J Forest (Alquiler/sem)	100	1	150
Xilohigrómetro. (Alquiler/sem.)	100		150
Micro Second Timer (MST) Fakopp Enterprise (Alquiler/sem.)	100	1	150
Balanza SB16001 DeltaRange		1	980
Forcípula		1	90
Calímetro digital		1	20.35
<u>TOTAL</u>	-	-	<u>1599.3€</u>

MANO DE OBRA	TARIFA (€/h)	CANTIDAD (h)	PRECIO TOTAL(€)
Técnico Ingeniero (h)	50	122	6100
Ayudante Técnico (h)	30	20	600
<u>TOTAL</u>	-	-	<u>6700</u>



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

TAREAS.	TARIFA (€/l.km);(€/h)	CANTIDAD	PRECIO TOTAL(€)
Mediciones en laboratorio	30	25(5dx5h)	750
Trabajo en laboratorio	30	20 (4dx5h)	600
Desarrollo escrito del proyecto	25	60(10dx6h)	1500
Elaboración anexos a la memoria	25	5	125
Cálculos del proyecto	50	12(2dx6h)	600
<u>Transporte Gasolina</u>			18.97+73.89=92.86
<u>TOTAL</u>	-	-	<u>3667.86€</u>

TOTAL EJECUCIÓN

MATERIAL 11967.16 €

15% Gastos Generales 1795.07

6% Beneficio Industrial 718.03

TOTAL EJECUCIÓN POR

CONTRATA 14480.25 €

21% I.V.A 3040.85

TOTAL PRESUPUESTO

C/IVA 17521.1 €



10. ANEXO III: INFORME EJECUTIVO

10.1 Descripción del proyecto.

El objetivo de este Proyecto Fin de Grado es la introducción a un estudio biomecánico de los árboles singulares de la especie *Fagus sylvatica* L. presentes en el Hayedo de Montejo de la Sierra como consecuencia del número llamativo de caídas de árboles y ramas que ha tenido lugar en los últimos años. Este hecho ha afectado especialmente a las hayas centenarias de gran valor para el bosque.

Con este proyecto se pretende avanzar en el conocimiento de las causas de rotura y orientar mediante actuaciones a su conservación.

La principal justificación a la solución de este proyecto es considerar al árbol como un elemento estructural, es decir como una viga en voladizo empotrado y sujeto a las leyes mecánicas, en el cuál se intentará analizar los problemas derivados de las cargas que soportan los árboles (nieve, viento, hojas,...) como también los puntos de rotura.

Este proyecto se puede llevar a cabo a partir de un número de ramas recolectadas en el hayedo, en las que se determinan propiedades físicas y mecánicas. Estas propiedades facilitarán la comprensión de los modos de fallo en los árboles singulares del Hayedo de Montejo de la Sierra.

Además, las ramas se han agrupado en dos grupos según diámetro y longitud. Esta clasificación permite ayudar a esclarecer los resultados obtenidos.

Como conclusiones del proyecto, se puede decir entre otros resultados, que existen relaciones entre el diámetro y la localización en la rama; las ramas gruesas y de longitud menor tienen mayor nº de nudos; en la determinación de las propiedades físicas y mecánicas se ha obtenido que a menor MOE a flexión, menor MOE dinámico, y a menor MOE dinámico menor MOR.

Como bien se ha dicho al comienzo del presente informe, este proyecto pretende ser una introducción para una posterior modelización del árbol desde el punto de vista mecánico. Podrá modelizarse a partir de un aparato LÍDAR que proporcionará las coordenadas de



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

cada una de las partes del árbol. Al modelo se le aplicarán unas cargas y unas propiedades mecánicas de la madera conocidas a partir de este proyecto, que servirán para estudiar el comportamiento de la estructura.

10.2 Valores del Proyecto

Entre los aspectos positivos que tiene la ejecución de este proyecto es que está contribuyendo a la conservación del Hayedo de Montejo. Ya que está aportando resultados y soluciones a los objetivos que se proponen, como es conocer la razón de su comportamiento y respuesta de los pies frente a agentes externos e internos a ellos.

Aporta información de cómo se van deformando las ramas como respuesta a la presencia de cargas hasta llegar al punto de la rotura. Además de la determinación de las zonas más propensas a la rotura.

Con la determinación de las propiedades físicas, se está determinando la cuantía de defectos en la madera, así como la resistencia y elasticidad que tiene la madera verde presente en el hayedo. Además de las relaciones que se sacan entre ellas (resistencia a la penetración- humedad, peso-humedad, densidad-peso, etc.)

El proyecto va dirigido a la Convocatoria 2014 Medio Ambiente de Acción Social de la Fundación Obra Social y Monte de Piedad de Madrid, donde a los gestores de este enclave de la Comunidad de Madrid les aporta datos muy interesantes y representativos para la orientación del estudio del comportamiento mecánico de los árboles.

Este proyecto y otros sucesivos (modelización del árbol desde el punto de vista mecánico) que se estén desarrollando en el Hayedo de Montejo, ayudaran a mantener y mejorar muy considerablemente los beneficios con el paso del tiempo de este monte. La principal razón es su gran valor cultural y ecológico porque se trata de un bosque de hayas muy poco frecuente en latitudes tan meridionales y que además alberga más de trecientas hayas centenarias, muchas de ellas de gran voluminosidad y algunas de ellas catalogadas como singulares.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Su valor cultural y ecológico junto con su gran belleza ha hecho que sea declarado Sitio Natural de Interés Nacional, como también declarado Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) y Reserva de la Biosfera por parte de la UNESCO.

10.3 Requisitos de financiación

La elaboración de la memoria y los anexos de este proyecto conlleva un presupuesto de 17.521,1 €, en el cuál se incluyen desplazamiento al Hayedo y al laboratorio, mediciones y ensayos en laboratorio, ejecución de tablas y gráficas, alquiler de material, etc.

Posteriormente a la elaboración de este proyecto no hay necesidad de financiación, ya que se trata de una parte de un estudio, en el cuál aportará unos datos que influirán en la toma de decisiones para la conservación del hayedo.

A la hora de hablar de la rentabilidad, hay que decir que aporta un valor no tangible, reportándonos una zona protegida de mayor valor cultural y ecológico. Desde el punto de vista económico se puede valorar el aumento del reclamo turístico en las zonas colindantes y los puestos de trabajo que genere la gestión de este bosque.

10.4 Aspectos críticos proyecto

Como aspectos críticos a nombrar en el presente proyecto es la falta de un mayor número de muestras que permitiesen esclarecer los resultados obtenidos con las 17 muestras tomadas, aunque para esto se requeriría una mayor dedicación de tiempo o la presencia de un mayor número de participantes que agilizarían las mediciones y elaboración de tablas y gráficos.

Este proyecto no deja de ser una introducción a un estudio del comportamiento mecánico de los árboles y a la modelización del árbol desde el punto de vista mecánico.



11. ANEXO IV: TABLAS DE ESTUDIOS PREVIOS AL PROYECTO.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Stem Diameter (inches)	For each new 1 inch diameter increment added:				
	Total Area Added (in ²)	% of Area Added (%)	Relative Strength Added	% of Strength Added (%)	Relative Structural Effectiveness (strength/in ²)
5	9	44	15	82	1.7
6	10	36	21	65	2.1
7	12	31	29	53	2.5
8	13	27	38	45	2.8
9	15	24	48	40	3.2
10	17	21	59	35	3.6
11	18	19	71	31	4.0
12	20	17	85	28	4.3
13	21	16	100	26	4.7
14	23	15	116	24	5.1
15	24	14	133	22	5.5
16	26	13	151	21	5.8
17	28	12	170	19	6.2
18	29	11	191	18	6.6
19	31	11	213	17	7.0
20	32	10	236	16	7.3
21	34	10	260	15	7.7
22	35	9	285	15	8.1
23	37	9	312	14	8.4
24	39	9	339	13	8.8
25	40	8	368	13	9.2
26	42	8	398	12	9.6
27	43	8	430	12	9.9
28	45	7	462	11	10.3
29	46	7	496	11	10.7
30	48	7	530	11	11.1
31	50	7	566	10	11.4
32	51	6	603	10	11.8
33	53	6	642	10	12.2
34	54	6	681	9	12.6
35	56	6	722	9	12.9
36	57	6	764	9	13.3
37	59	6	807	8	13.7
38	61	5	851	8	14.1
39	62	5	896	8	14.4

Tabla 1: Incremento de la fuerza en el tallo y efectividad en su porte con el incremento del diámetro. (Kim D. Coder 2000).



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

En la tabla anterior, se observa que en las primeras fases de crecimiento del tallo, en el incremento de su diámetro, la cantidad de superficie destinada a la resistencia aumenta muy considerablemente hasta un momento donde el crecimiento en diámetro, la superficie resistente añadida ya no es tan elevada.

stem diameter	relative strength	stem diameter	relative strength	stem diameter	relative strength
1 in.	1	30	810,000	60	12,960,000
		31	923,521	61	13,845,841
2	16	32	1,048,576	62	14,776,336
3	81	33	1,185,921	63	15,752,961
4	256	34	1,336,336	64	16,777,216
5	625				
		35	1,500,625	65	17,850,625
6	1,296	36	1,679,616	66	18,974,736
7	2,401	37	1,874,161	67	20,151,121
8	4,096	38	2,085,136	68	21,381,376
9	6,561	39	2,313,441	69	22,667,121
10	10,000	40	2,560,000	70	24,010,000
11	14,641	41	2,825,761	71	25,411,681
12	20,736	42	3,111,696	72	26,873,856
13	28,561	43	3,418,801	73	28,398,241
14	38,416	44	3,748,096	74	29,986,576
15	50,625	45	4,100,625	75	31,640,625
16	65,536	46	4,477,456	80	40,960,000
17	83,521	47	4,879,681	85	52,200,625
18	104,976	48	5,308,416	90	65,610,000
19	130,321	49	5,764,801	95	81,450,625
20	160,000	50	6,250,000	100	100,000,000
21	194,481	51	6,765,201	105	121,550,625
22	234,256	52	7,311,616	110	146,410,000
23	279,841	53	7,890,481	115	174,900,625
24	331,776	54	8,503,056	120	207,360,000
25	390,625	55	9,150,625		
26	456,976	56	9,834,496		
27	531,441	57	10,556,001		
28	614,656	58	11,316,496		
29	707,281	59	12,117,361		

relative strength formula = (• • x (DIAMETER⁴)) / 64

Tabla 2: Comparación de la fuerza relativa de diámetros en pulgadas con la fuerza del diámetro de una pulgada.

En la anterior tabla se muestra que para cada incremento del diámetro en pulgadas, cuánta fuerza relativa adquiere el tallo respecto al tallo de diámetro 1 pulgadas. Por ejemplo, para 10 pulgadas de diámetro del tallo, la fuerza relativa que tiene el tallo es 10 veces mayor que para el tallo de 1 pulgada de diámetro.



12. ANEXO V: TABLAS DE MEDICIONES DE LAS RAMAS



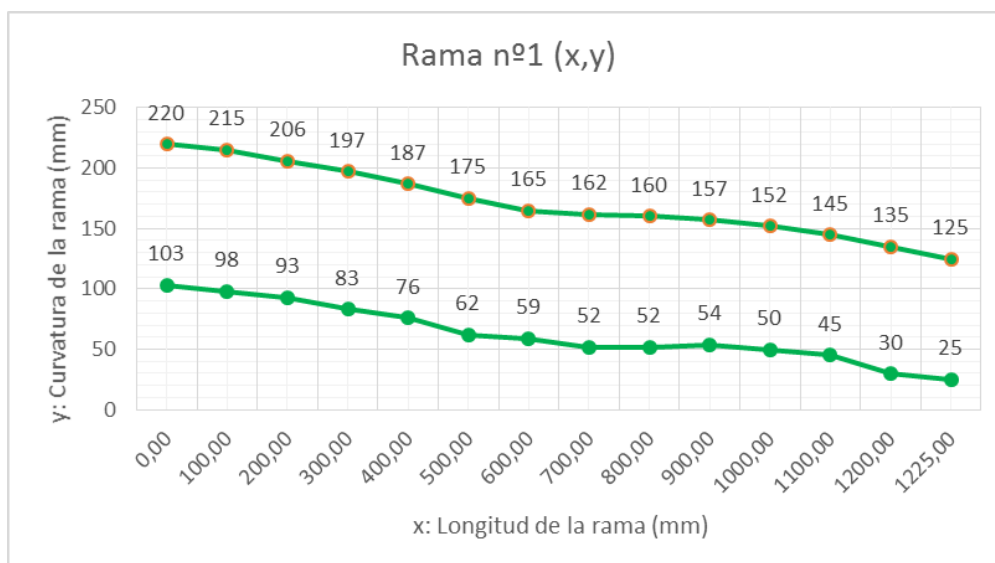
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Nº probeta: 1

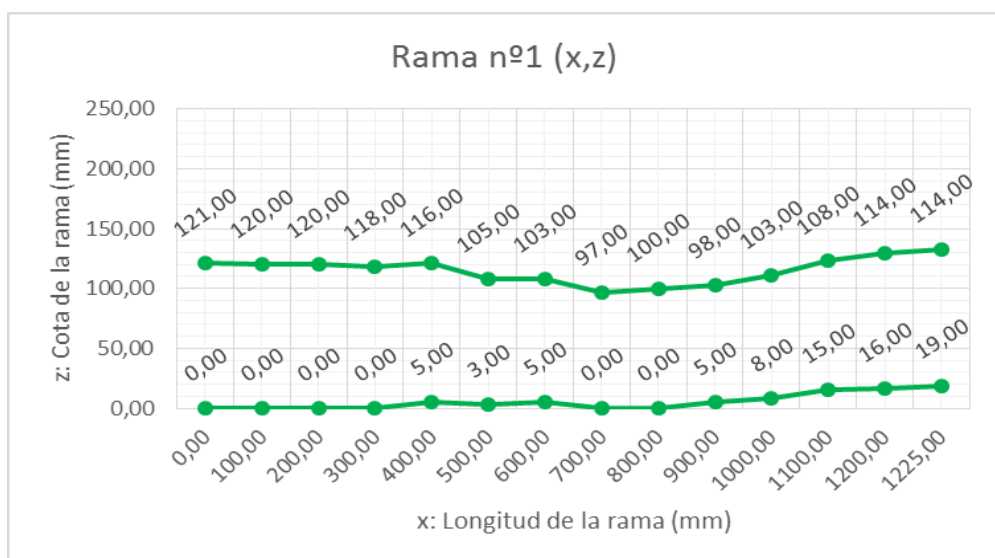
Longitud de la probeta: 1225 mm

Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	115,5	121	F1=30; F2=60 F3=56 F4=42	0	103 220	0 121
100	155	118,8		100	98 215	0 112
200	115	114,5	N1=10; N2=13	200	93 206	0 118
300	113	106,5	N3=113	300	83 197	5 116
400	114,5	104	N4=10 Protuberancia	400	76 187	3 105
500	114,5	100	N5=10; N6=14	500	62 59	5 103
600	110	100	N7=18	600	59 165	0 97
700	108,5	980	N8=10	700	52 162	0 100
800	107	975	N9=15	800	52 160	0 100
900	105,5	970	N10=10; N11=15	900	54 157	5 98
1000	106	950	Protuberancia N12=10	1000	50 152	8 103
1100	103	940	N13=0,6; N14=18	1100	45 145	15 108
1200	103	949		1200	30 135	16 114
1225	102	940	N15=12 F5=50; F6=60	1225	25 125	19 114

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 1: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 2: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1225,00
Diámetro medio (mm)	104,87
Masa (g)	8870,00
Densidad (kg/m ³)	782.885

Tabla 2: propiedades físicas rama 1.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	12
Ultrasonido (µs)	280
Xilohigrómetro (H %)	65

Tabla 3: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 1.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Nº probeta: 2

Longitud de la probeta: 1670 mm

Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	68,00	61,40		0	302,00	0,00
100	64,50	61,00		100	374,00	62,00
200	68,00	63,00		200	288,00	0,00
300	68,00	71,00		300	355,00	61,00
400	67,00	63,00		400	255,00	5,00
500	66,00	85,50	N1=30,00 Bifurcación	500	323,00	60,00
600	62,50	64,50		600	180,00	15,00
700	63,50	63,00	N2=15,00	700	275,00	85,00
800	63,00	64,00	N3=20	800	120,00	40,00
900	59,00	56,50		900	195,00	100,00
1000	60,00	58,00	N4=15,00	1000	100,00	45,00
1100	57,00	56,50	N5=15,00	1100	166,00	110,00
1200	60,00	56,00	N6=10	1200	90,00	25,00
1300	58,50	53,00	N7=20	1300	155,00	80,00
					75,00	15,00
					135,00	70,00
					75,00	0,00
					140,00	70,00
					90,00	15,00
					150,00	60,00
					65,00	15,00
					120,00	70,00
					56,00	25,00
					113,00	70,00
					52,00	20,00
					110,00	75,00
					57,00	20,00
					115,00	75,00

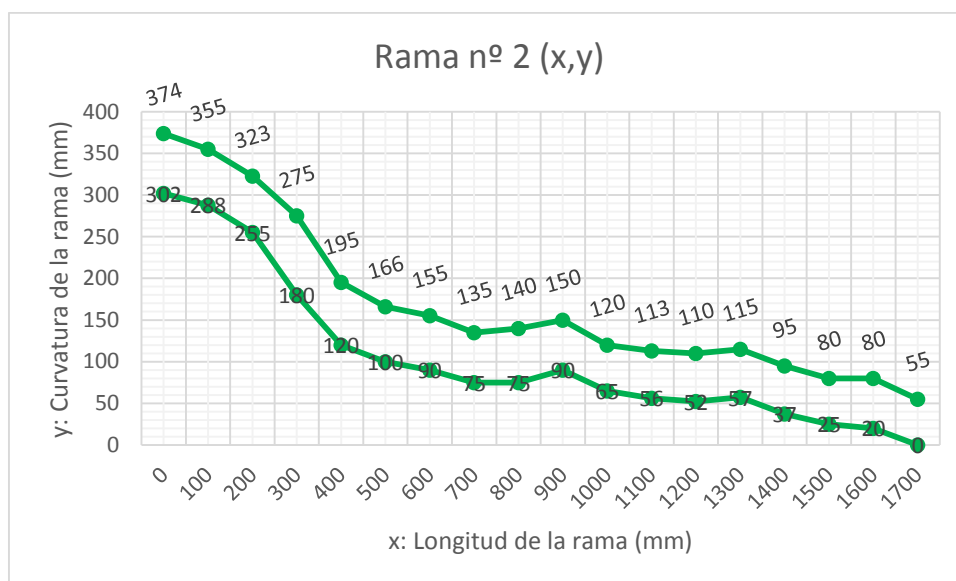


Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

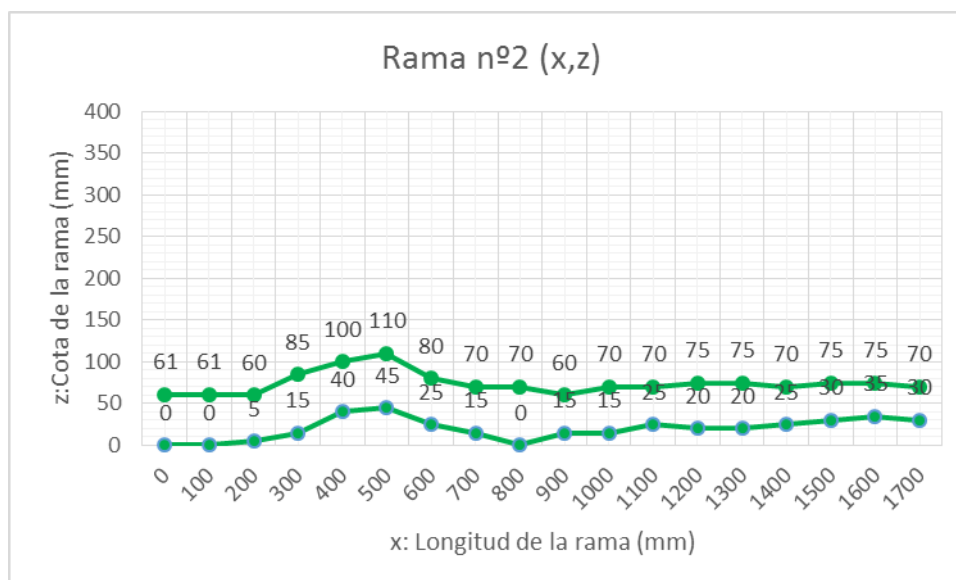
1400	60,00	53,50	N8=10,00 N9=12,00	1400	37,00 95,00	25,00 70,00
1500	63,70	54,00	N10=10,00 N11=25,00	1500	25,00 80,00	30,00 75,00
1600	55,00	50,00	N12=20	1600	20,00 80,00	35,00 75,00
1670	53,40	48,00		1670	0,00 55,00	30,00 70,00

Continuación de la tabla de la rama 2.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 3: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 4: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1670,00
Diámetro medio (mm)	61,08
Masa (g)	3885,00
Densidad (kg/m ³)	779,40

Tabla 5: propiedades físicas rama 2.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	13
Ultrasonido (μs)	469
Xilohigrómetro (H %)	66

Tabla 6: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 2.



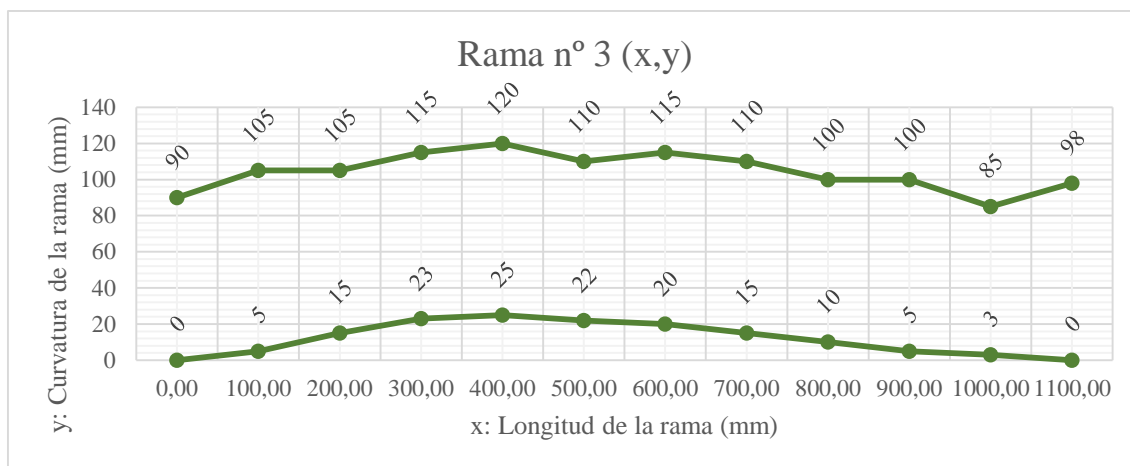
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Longitud: 1050 mm

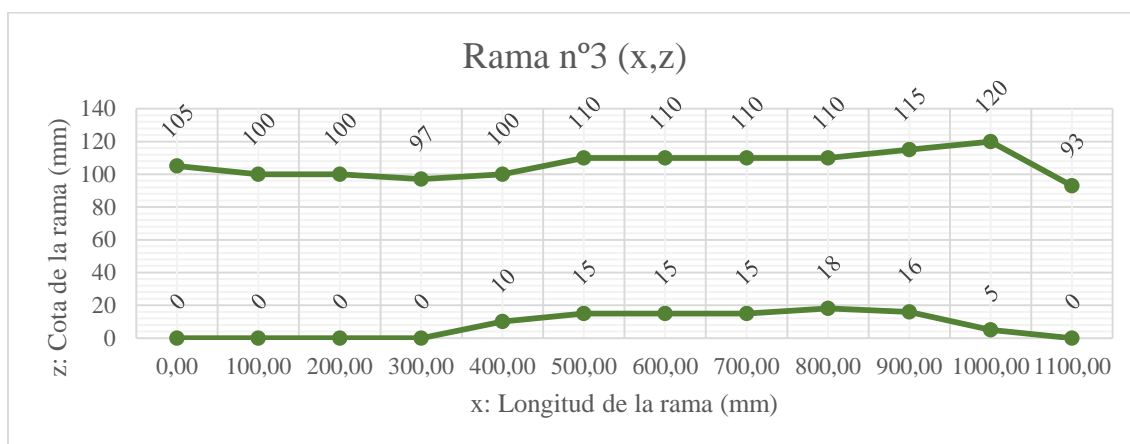
Nº probeta: 3

Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	94,00	98,00	F1=75,00 F2=50,00 F3=55,00 F4=55,00	0	0,00	0,00
100	95,00	96,00		100	90,00	105,00
200	94,50	97,00		200	5,00	0,00
300	98,00	98,50	N1=15,00 N2= 15,00	300	105,00	100,00
400	93,00	96,00		400	15,00	0,00
500	91,00	95,00		500	23,00	97,00
600	91,50	93,00		600	115,00	10,00
700	91,00	95,00	N3=20,00	700	120,00	100,00
800	93,00	94,50	N4=20,00	800	22,00	15,00
900	97,00	102,00	N5=25,00	900	110,00	110,00
1000	92,00	110,00	Bifurcación	1000	20,00	15,00
1050	90,00	92,00	F5=60,00	1100	15,00	15,00

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 5: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 6: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1050,00
Diámetro medio (mm)	93,29
Masa (g)	5714,00
Densidad (kg/m ³)	695,93

Tabla 8: propiedades físicas rama 3.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	13
Ultrasonido (μs)	469
Xilohigrómetro (H %)	66

Tabla 9: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 3.



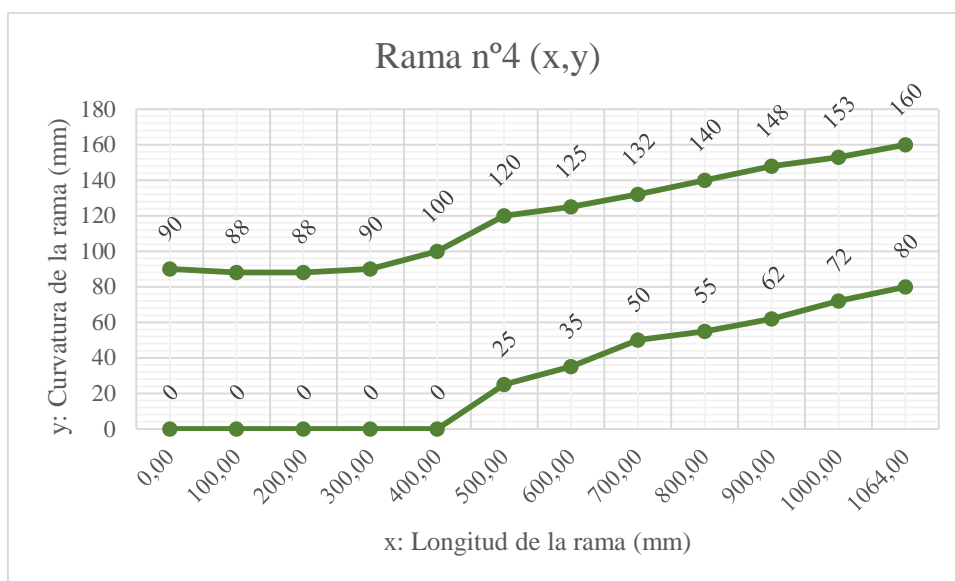
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Longitud: 1064 mm

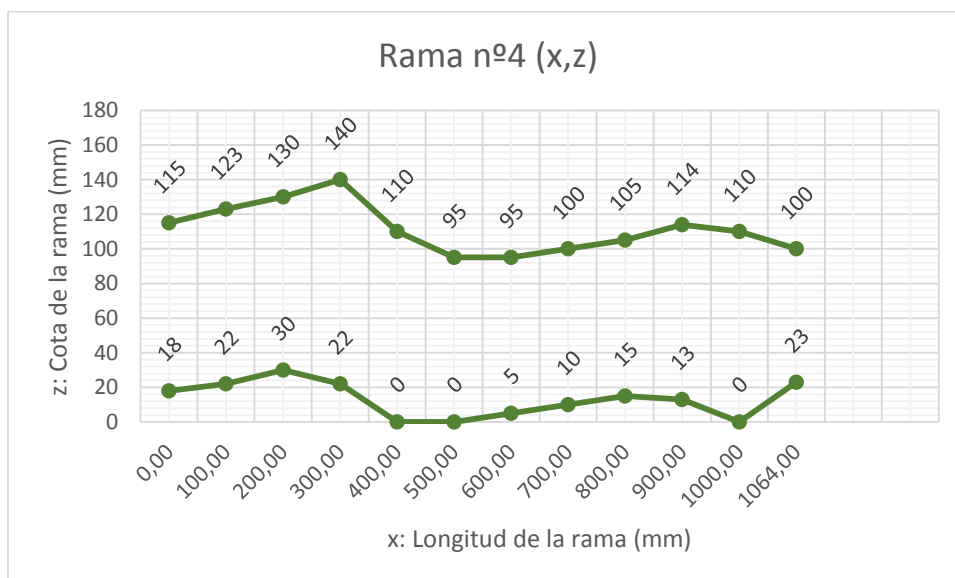
Nº probeta: 4

Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	100,00	103,00	F1=45,00 F2=90,00 N1=15,00	0	0,00	18,00
100	101,00	103,00		100	0,00	115,00
200	102,50	105,50		200	88,00	22,00
300	104,50	120,00		300	0,00	123,00
400	102,00	108,50	N2=20,00 N3=30,00	400	0,00	30,00
500	94,50	95,00		500	88,00	130,00
600	86,50	93,00		600	0,00	22,00
700	86,00	90,00		700	90,00	140,00
800	85,50	88,00		800	0,00	0,00
900	84,00	95,00	N4=20,00	900	120,00	95,00
1000	84,00	109,00		1000	35,00	5,00
1064	82,00	88,00	F3=53,00 F4=55,00 F5=50,00	1160	125,00	95,00
					50,00	10,00
					132,00	100,00
					55,00	15,00
					140,00	105,00
					62,00	13,00
					148,00	114,00
					72,00	0,00
					153,00	110,00
					80,00	23,00
					160,00	10

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 7: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 8: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1064,00
Diámetro medio (mm)	94,25
Masa (g)	6630,00
Densidad (kg/m ³)	658,52

Tabla 11: propiedades físicas rama 4.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	13
Ultrasonido (µs)	269
Xilohigrómetro (H %)	76

Tabla 12: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 4.



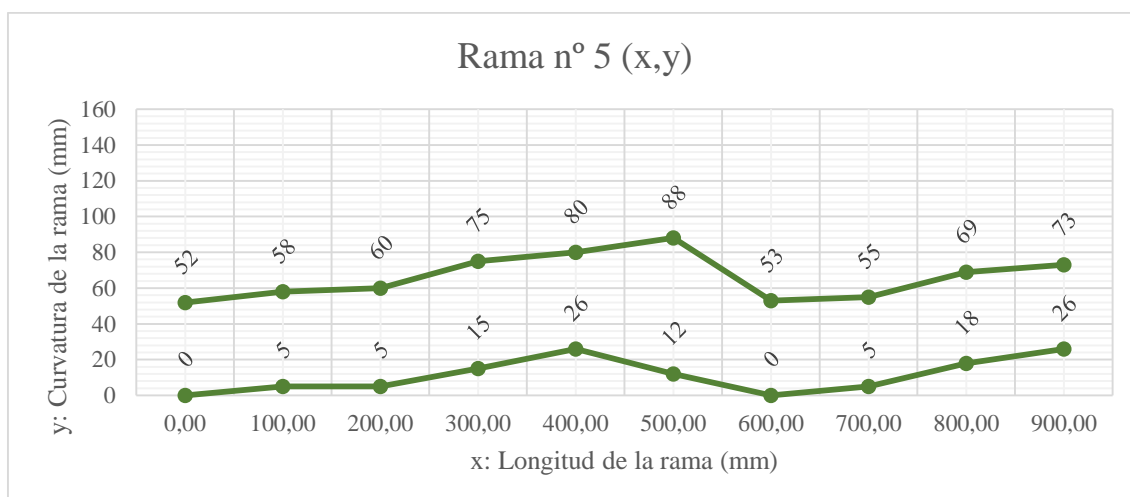
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Longitud: 900 mm

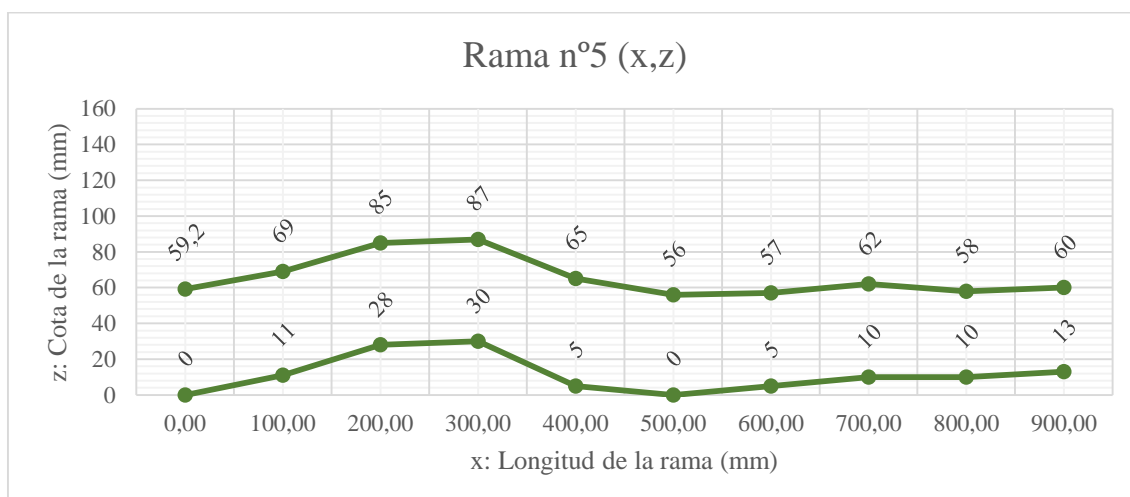
Nº probeta: 5

Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	52,80	59,20	F1=30,00	0	0,00	0,00
100	55,40	58,30	N1=10,00	100	5,00	11,00
200	53,30	58,30	N2=12,00 N3=13,00	200	5,00	28,00
300	54,60	58,20	N4=15,00	300	15,00	30,00
400	53,90	59,70	N5=10,00	400	26,00	5,00
500	73,30	56,40	N6=25,00	500	12,00	0,00
600	53,20	54,00	N7=10,00	600	0,00	5,00
700	52,00	55,20	N8=22,00	700	53,00	57,00
800	47,40	48,20		800	5,00	10,00
900	47,30	46,30		900	55,00	62,00
					18,00	10,00
					69,00	58,00
					26,00	13,00
					73,00	60,00

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 8: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 9: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	900,00
Diámetro medio (mm)	52,85
Masa (g)	1456,50
Densidad (kg/m³)	658,52

Tabla 14: propiedades físicas rama 5.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	15
Ultrasonido (µs)	234
Xilohigrómetro (H %)	67,5

Tabla 15: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 5.

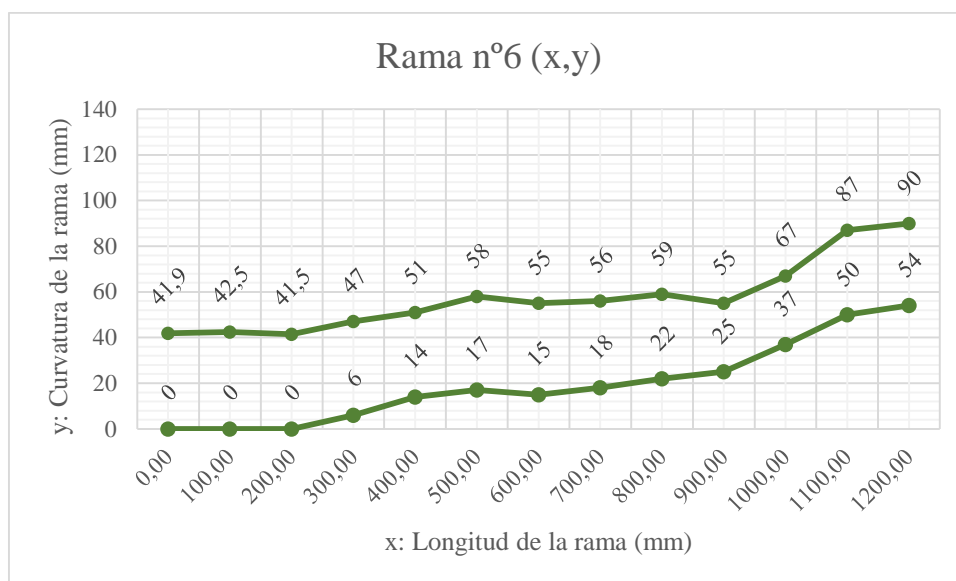
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Longitud: 1185 mm

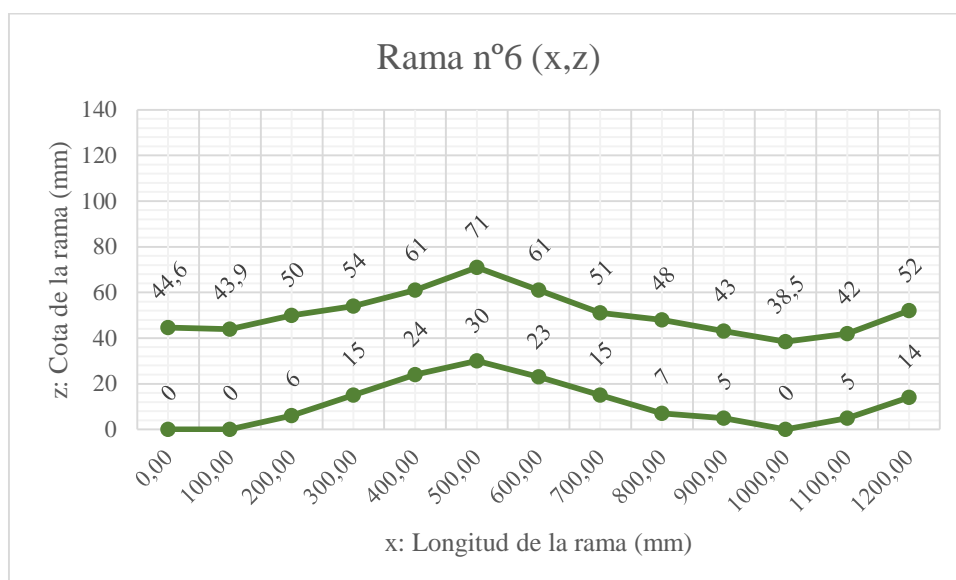
Nº probeta: 6

Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	41,90	44,60		0	0,00	0,00
100	42,50	43,90		100	41,9	44,60
200	41,50	43,90	N1=23,00	200	0,00	0,00
300	40,90	41,40		300	42,50	43,90
400	41,40	40,10		400	0,00	6,00
500	41,90	40,80	N2=21,00 N3=12,00	500	41,50	50,00
600	40,40	38,50		600	6,00	15,00
700	39,60	37,70		700	47,00	54,00
800	39,70	38,30		800	14,00	24,00
900	39,40	38,50		900	51,00	61,00
1000	39,60	38,50		1000	17,00	30,00
1100	38,40	37,90		1100	58,00	71,00
1185,50	37,90	42,00		1200	15,00	23,00
					55,00	61,00
					18,00	15,00
					56,00	51,00
					22,00	7,00
					59,00	48,00
					25,00	5,00
					43,00	43,00
					37,00	0,00
					50,00	38,50
					50,00	5,00
					87,00	42,00
					54,00	14,00
					90,00	52,00

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 11: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 12: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1185,00
Diámetro medio (mm)	38,42
Masa (g)	1021,00
Densidad (kg/m³)	683,64

Tabla 17: propiedades físicas rama 6.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	10
Ultrasonido (µs)	300
Xilohigrómetro (H %)	30

Tabla 18: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 6.



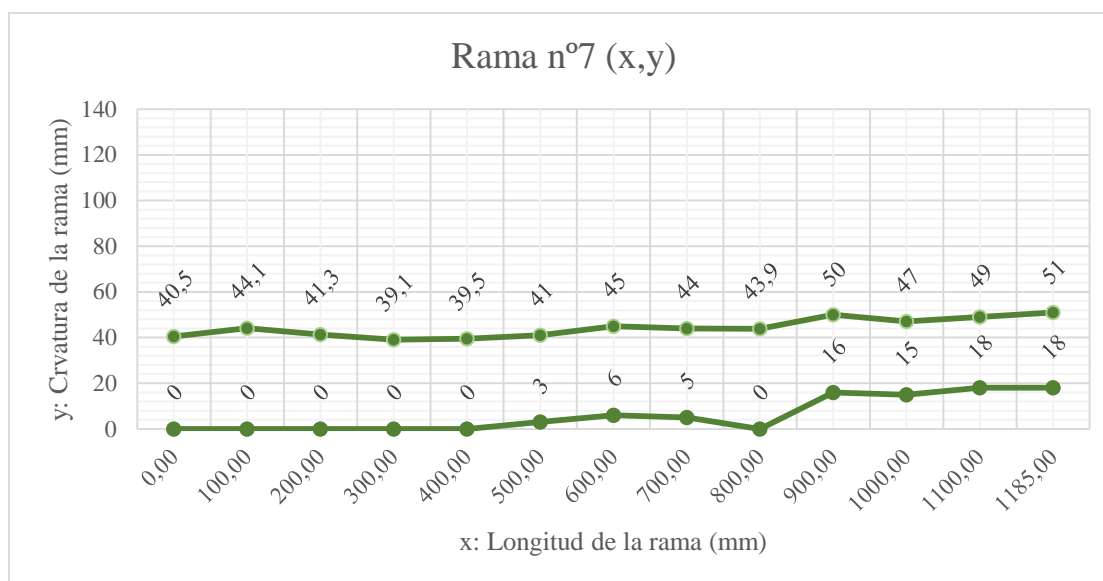
Longitud: 1185 mm

Nº probeta: 7

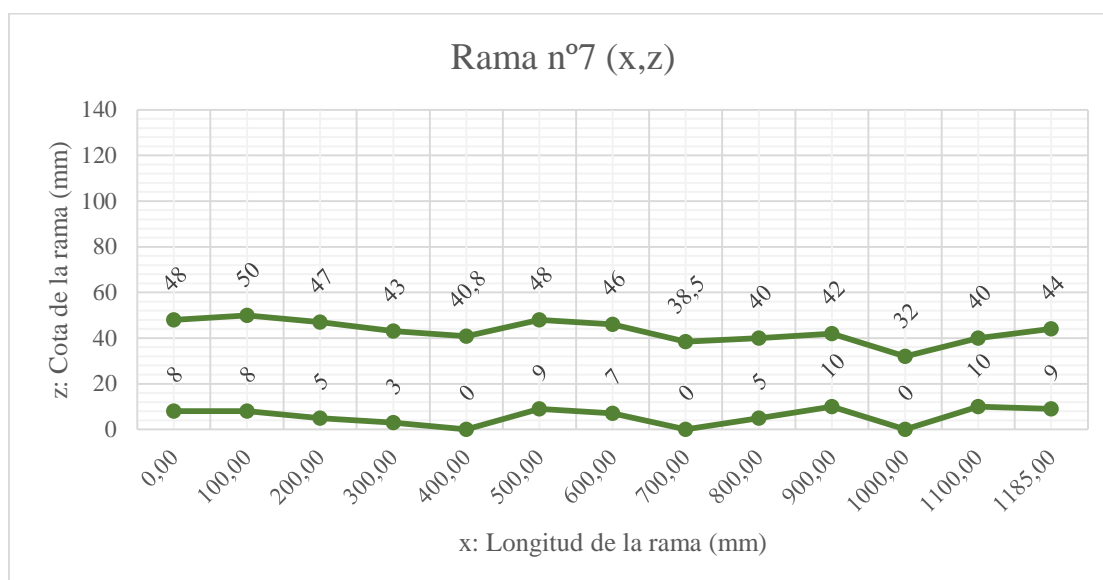
Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	40,50	41,50		0	0,00	8,00
100	44,10	43,80		100	0,00	8,00
200	41,30	41,50		200	0,00	5,00
300	39,10	40,60		300	0,00	3,00
400	39,50	40,80		400	0,00	0,00
500	38,90	38,80		500	3,00	9,00
600	37,90	38,60		600	6,00	7,00
700	39,20	38,50	N1=18,00	700	5,00	0,00
800	43,90	34,40	N2=23,00 Bifurcación	800	0,00	5,00
900	33,50	31,40		900	16,00	10,00
1000	34,50	32,00		1000	15,00	0,00
1100	31,60	30,60		1100	18,00	10,00
1185,00	36,20	34,00		1200	18,00	9,00
					51,00	44,00



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 13: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 14: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1185
Diámetro medio (mm)	35,95
Masa (g)	867,30
Densidad (kg/m ³)	650,44

Tabla 20: propiedades físicas rama 7.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	15
Ultrasonido (μs)	308
Xilohigrómetro (H %)	59

Tabla 21: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 7.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

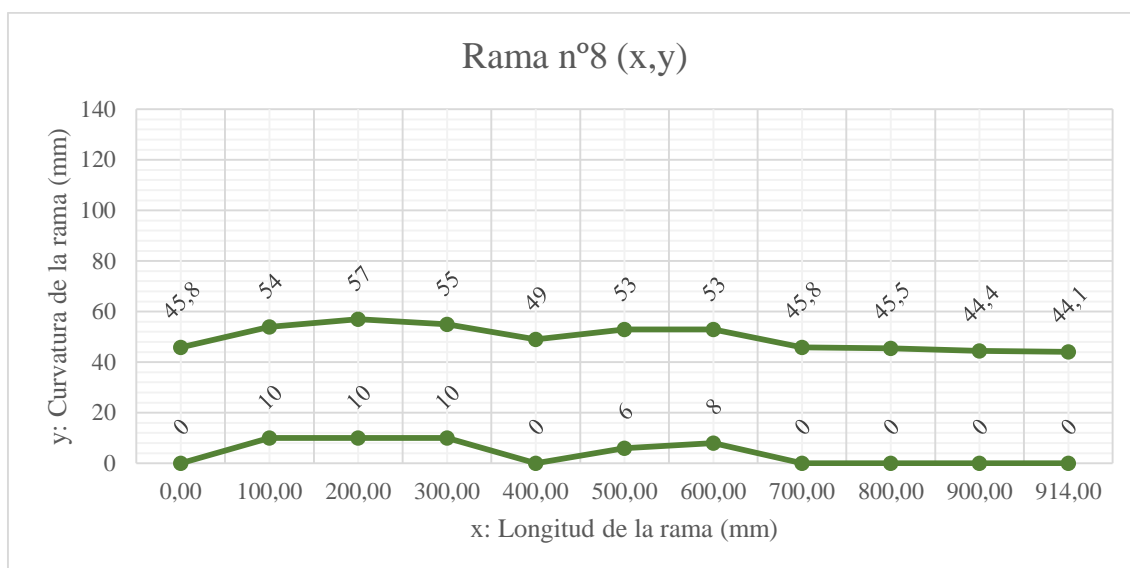
Nº probeta: 8

Longitud: 914 mm

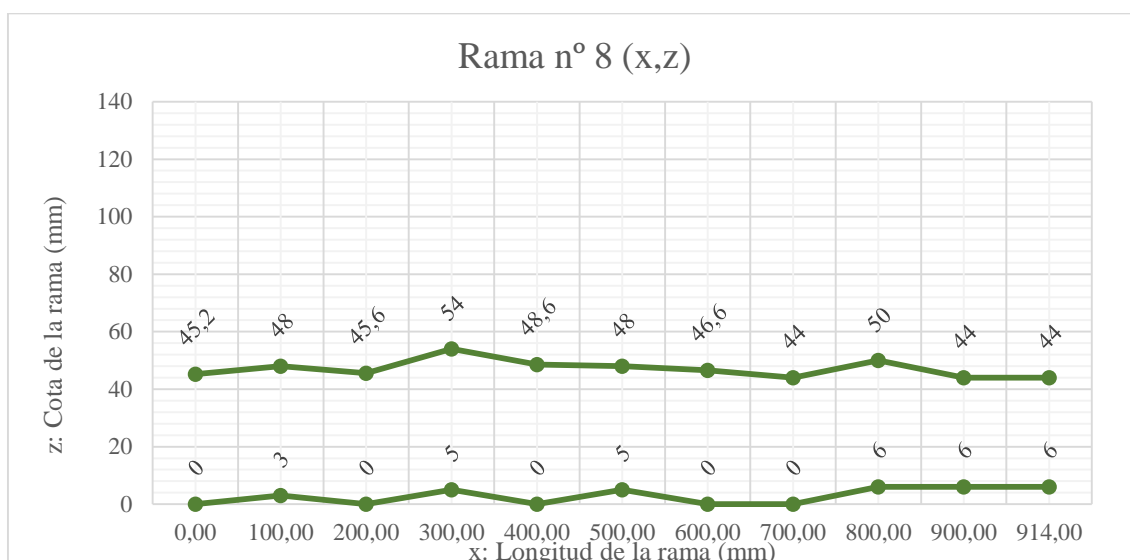
Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	45,80	45,20		0	0,00 45,80	0,00 45,20
100	46,30	45,30		100	10,00 54,00	3,00 48,00
200	47,70	45,60		200	10,00 57,00	0,00 45,60
300	47,30	50,00	N1=10,00	300	10,00 55,00	5,00 54,00
400	49,00	48,60	N2=20,00	400	0,00 49,00	0,00 48,60
500	47,70	44,60		500	6,00 53,00	5,00 48,00
600	47,40	46,60		600	8,00 53,00	0,00 46,60
700	45,80	44,60	N3=10,00	700	0,00 45,80	0,00 44,00
800	45,50	44,10		800	0,00 45,50	6,00 50,0
900	44,40	40,80		900	0,00 44,40	6,00 44,00
914	44,10	40,30		1000	0,00 44,10	6,00 44,00



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 15: Curvatura de la rama vista desde planta



Gráfica 16: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	914
Diámetro medio (mm)	43,75
Masa (g)	990,50
Densidad (kg/m³)	597,49

Tabla 23: propiedades físicas rama 8.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	14
Ultrasonido (µs)	213
Xilohigrómetro (H %)	51

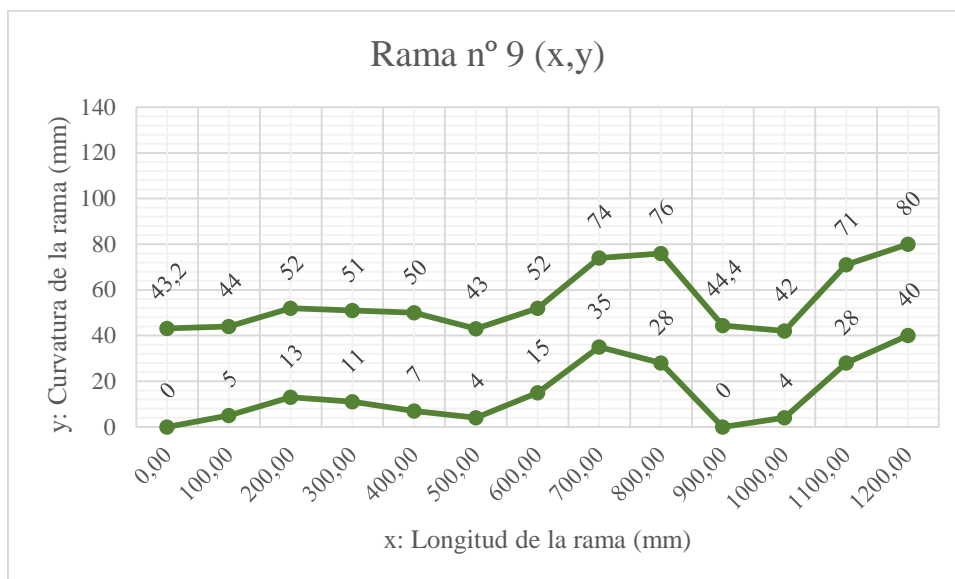
Tabla 24: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 8.



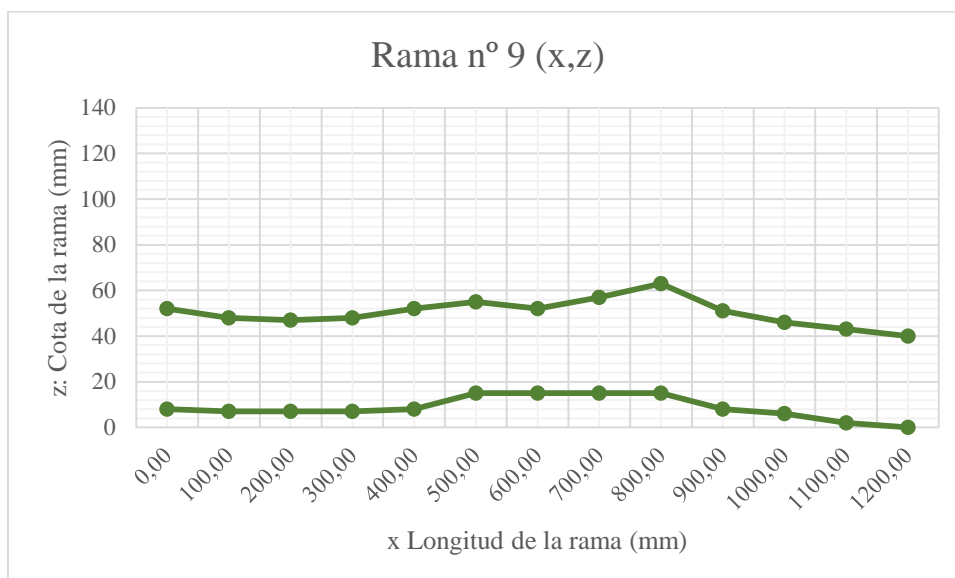
Nº probeta: 9 Longitud: 1135 mm

Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	43,20	46,40	N1=15,00	0	0,00	8,00
100	41,30	42,90		100	43,20	52,00
200	41,50	42,30		200	5,00	7,00
300	41,00	42,80	N2=15,00	300	44,00	48,00
400	41,10	43,00		400	13,00	7,00
500	40,00	41,00		500	52,00	47,00
600	38,70	44,30		600	11,00	7,00
700	38,30	41,20		700	51,00	48,00
800	46,90	49,00		800	7,00	8,00
900	44,40	42,20		900	50,00	52,00
1000	38,50	39,70	N3=10,00	1000	43,00	15,00
1100	38,30	41,50	N4=13,00	1100	76,00	63,00
1135	36,00	40,60		1135	0,00	8,00
					44,4	51,00
					4,00	6,00
					42,00	46,00
					28,00	2,00
					71,00	43,00
					40,00	0,00
					80,00	40,00

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 17: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 18: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1135,00
Diámetro medio (mm)	38,73
Masa (g)	1200,30
Densidad (kg/m ³)	736,16

Tabla 26: propiedades físicas rama 9.

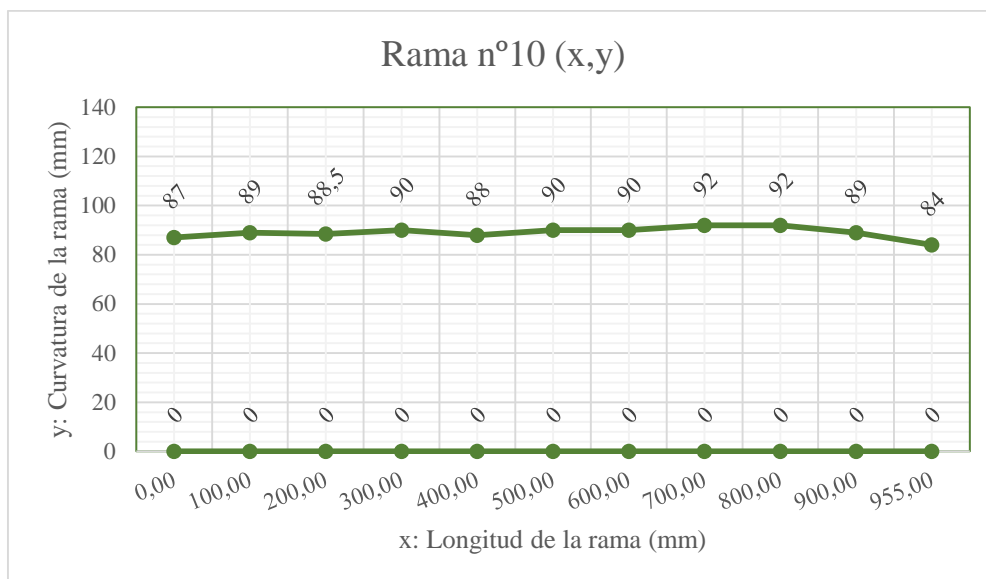
Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	9
Ultrasonido (μs)	291
Xilohigrómetro (H %)	24

Tabla 27: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 9.

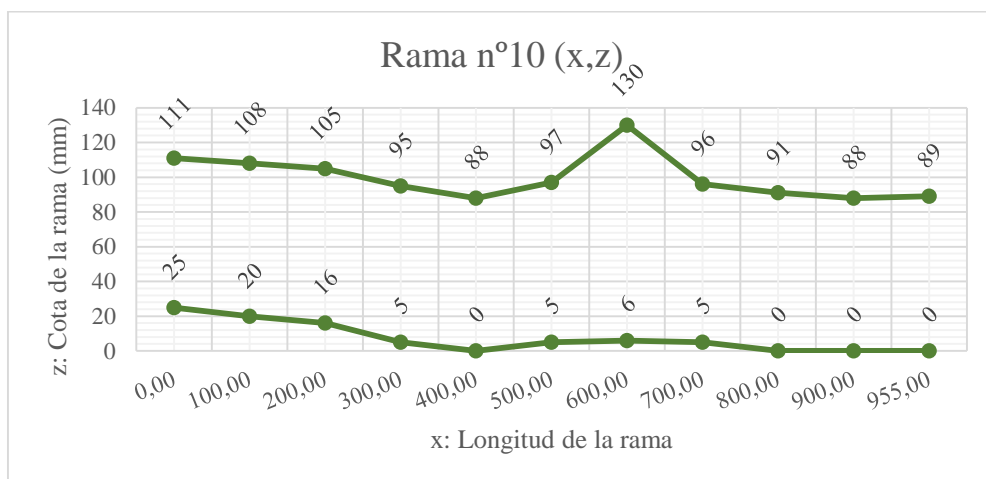
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Nº probeta: 10		Longitud: 955 mm				
Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	87,00	86,00	F1=45,00 F2=65,00 F3=60 F4=45,00	0	0,00	25,00
100	89,00	85,00		100	0,00	111,00
200	88,50	87,50	N1= 10,00	200	0,00	20,00
300	90,00	90,00	N2=23,00	300	0,00	108,00
400	88,00	88,00		400	0,00	16,00
500	90,00	91,00	N3=13,00	500	0,00	105,00
600	90,00	90,00	N4=10 N5=13	600	0,00	5,00
700	92,00	88,00	N6=10	700	0,00	97,00
800	92,00	88,00		800	0,00	6,00
900	89,00	88,00		900	0,00	130,00
955	84,00	87,50	F5=60,00 F6=44,00 F7=40,00 F8=50,00 F9=40,00	1000	0,00	5,00

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 19: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 20: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	955,00
Diámetro medio (mm)	86,56
Masa (g)	4193,00
Densidad (kg/m ³)	673,18

Tabla 29: propiedades físicas rama 10.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	14
Ultrasonido (µs)	209
Xilohigrómetro (H %)	74,7

Tabla 30: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 10.



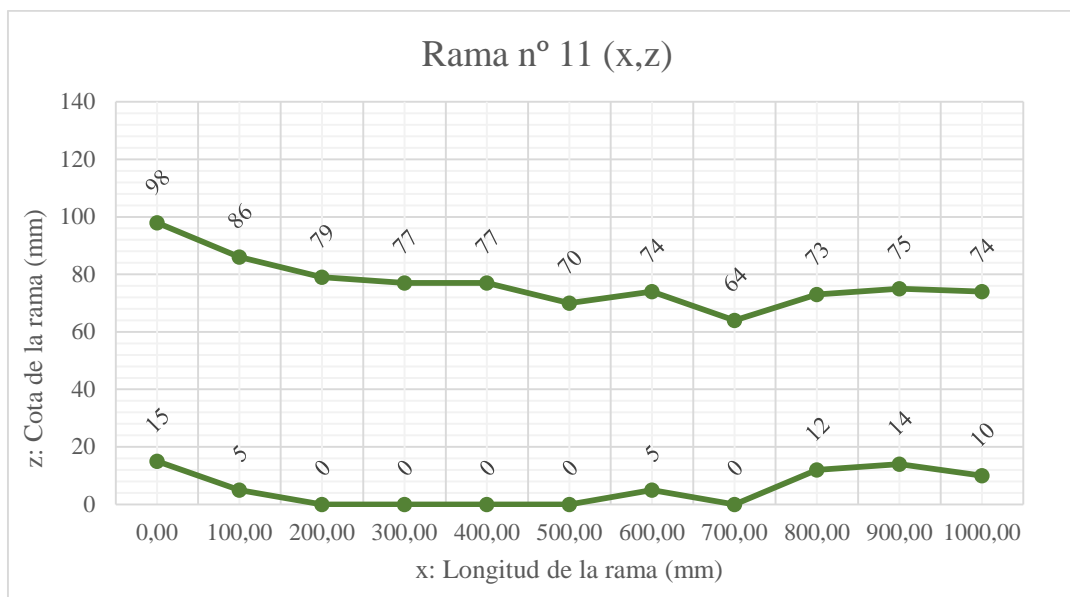
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Nº probeta: 11

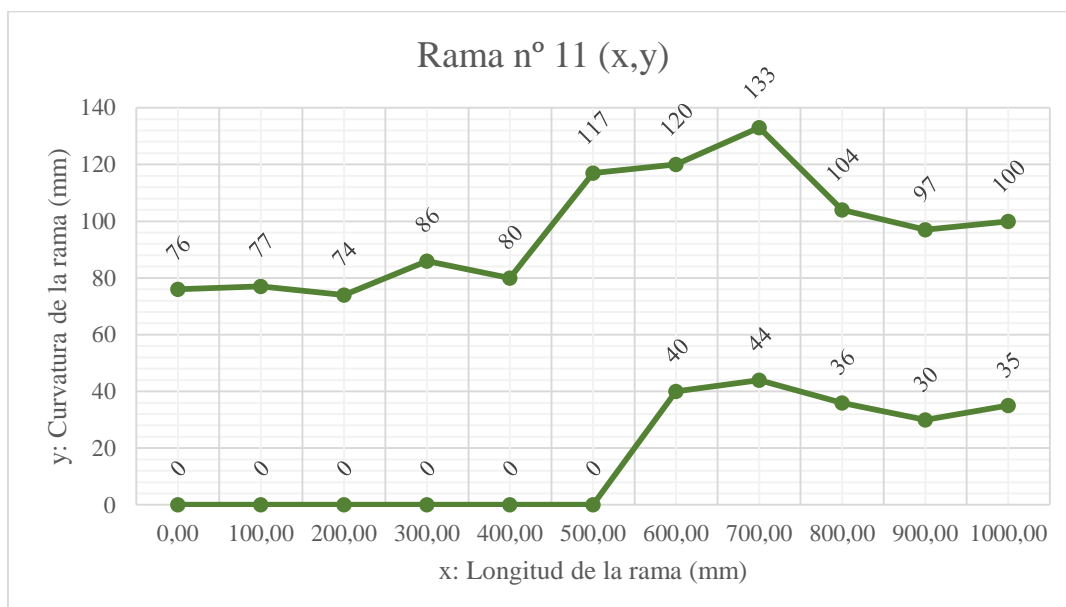
Longitud: 1000 mm

Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	76,00	82,00	N1=10,00	0	0,00	15,00
100	77,00	79,00	N2=20,00	100	0,00	98,00
200	74,00	79,00	N3=45,00	200	77,00	5,00
300	86,00	77,00		300	0,00	86,00
400	80,00	77,00	N4=35,00 N5=55,00	400	0,00	0,00
500	117,00	70,00		500	80,00	77,00
600	88,00	70,00	N6=25,00	600	0,00	0,00
700	88,00	64,00	N7=15,00	700	117,00	70,00
800	69,00	60,00	N8=10,00	800	40,00	5,00
900	65,00	60,00	N9=10,00	900	120,00	74,00
1000	64,00	61,00		995	44,00	0,00
					133,0	64,00
					36,00	12,00
					104,00	73,00
					30,00	14,00
					97,00	75,00
					35,00	10,00
					100,00	74,00

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 21: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 22: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1000,00
Diámetro medio (mm)	73,59
Masa (g)	3536,00
Densidad (kg/m ³)	745,00

Tabla 32: propiedades físicas rama 11.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	15
Ultrasonido (µs)	380
Xilohigrómetro (H %)	70,00

Tabla 33: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 11.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Nº probeta: 12		Longitud: 1465 mm				
Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	48,00	51,60		0	0,00 48,60	28,00 84,00
100	54,00	53,20	N1=20,00 N2=20,00	100	0,00 54,00	30,00 84,00
200	52,00	52,70		200	0,00 52,00	27,00 80,00
300	51,60	51,90		300	0,00 51,60	24,00 73,00
400	52,40	51,30		400	0,00 52,40	0,00 51,30
500	51,40	51,80		500	4,00 55,00	7,00 60,00
600	52,90	51,80	N3=20,00 N4=15,00 N5=15,00	600	4,00 60,00	6,00 58,00
700	62,80	49,80		700	0,00 62,50	0,00 50,00
800	53,00	50,70		800	6,00 58,00	5,00 54,00
900	48,00	46,60		900	14,00 60,00	4,00 51,00
1000	47,00	46,50		1000	15,00 55,00	0,00 48,00
1100	50,00	48,70		1100	16,00 65,00	0,00 49,00



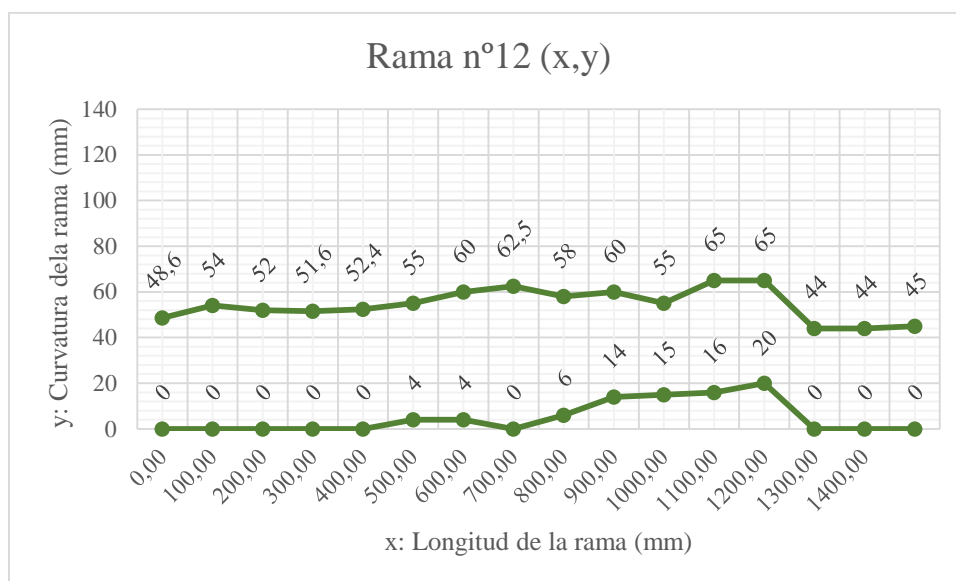
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

1200	50,45	49,00	N6=15,00 N7=15,00 N8=15,00	1200	20,00 65,00	8,00 55,00
1300	44,00	44,00		1300	0,00 44,00	33,00 82,00
1400	43,80	42,90		1400	0,00 44,00	53,00 98,00
1465	44,70	41,40		1500	0,00 45,00	65,00 107,00

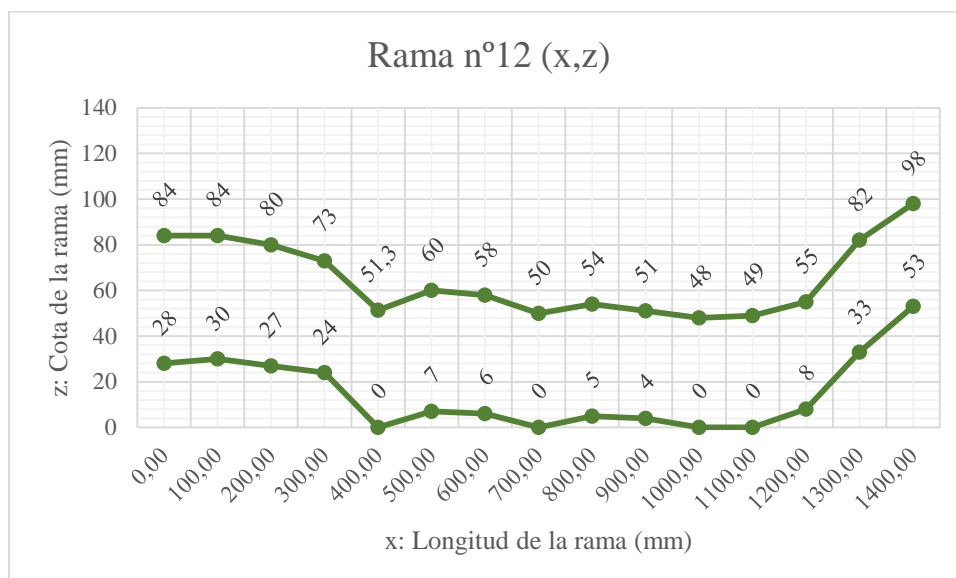
Continuación de la tabla de la rama nº12.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 23: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 24: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1465,00
Diámetro medio (mm)	47,72
Masa (g)	1948,10
Densidad (kg/m ³)	687,65

Tabla 35: propiedades físicas rama 12.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	15
Ultrasonido (μs)	416
Xilohigrómetro (H %)	70,00

Tabla 36: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 12.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Nº probeta: 13		Longitud: 1983 mm				
Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	55,40	53,40		0	0,00	0,00
100	55,30	56,00	N1=20,00	100	55,40	53,40
200	53,70	57,50		200	16,00	13,00
300	50,10	53,50		300	71,00	70,00
400	51,90	60,20	N2=20,00 N3=20,00 N4=10,00	400	30,00	16,00
500	72,30	61,70	N5=20,00	500	85,00	72,00
600	59,40	52,30	N6=30,00	600	105,00	65,00
700	53,10	49,20		700	50,00	0,00
800	48,80	45,80		800	120,00	61,70
900	48,40	46,70		900	56,00	20,00
1000	48,40	45,90		1000	113,00	74,00
1100	46,00	42,90		1100	60,00	25,00
					111,00	76,00
					51,00	32,00
					100,00	77,00
					41,00	32,00
					88,00	78,00
					33,00	35,00
					80,00	79,00
					35,00	34,00
					78,00	78,00

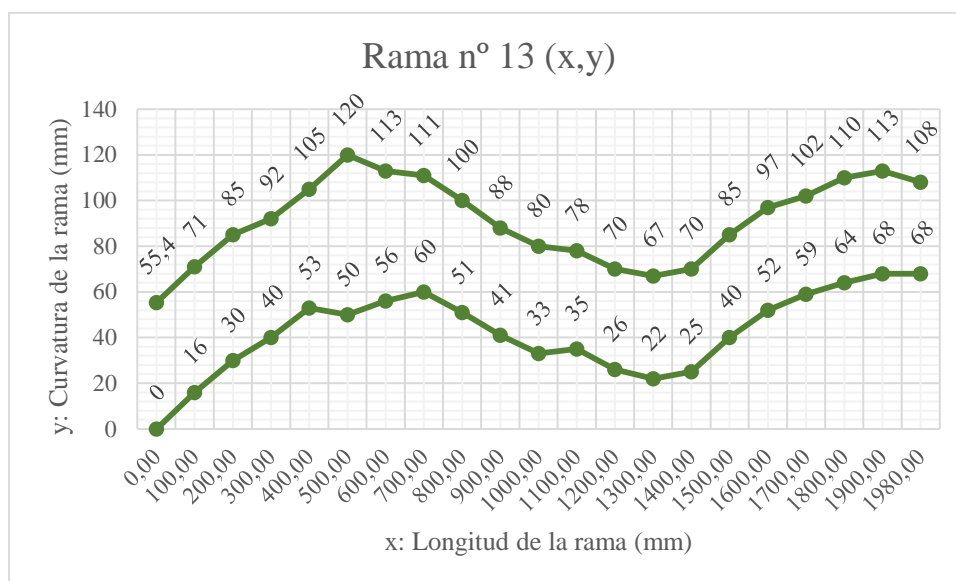


Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

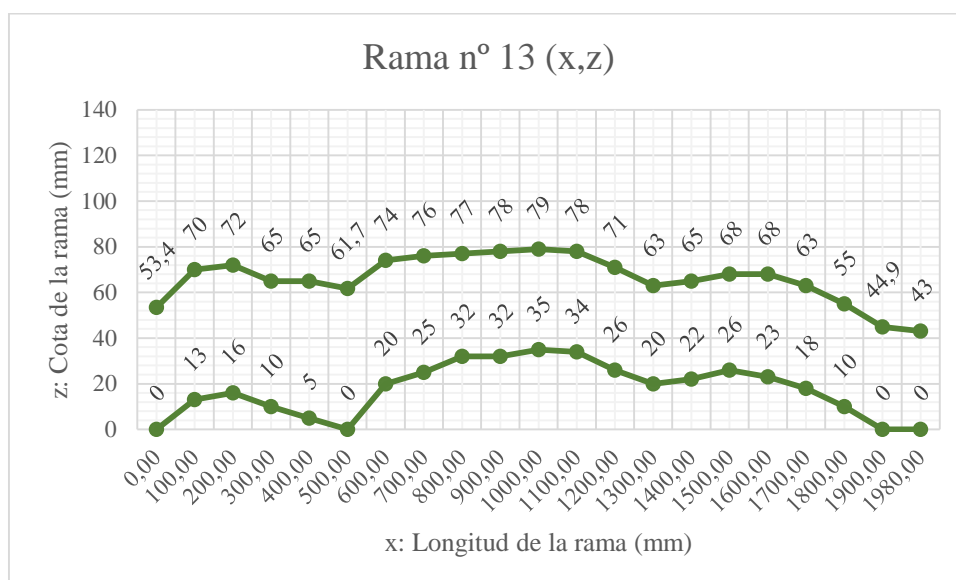
1200	45,60	42,30		1200	26,00 70,00	26,00 71,00
1300	45,70	42,30		1300	22,00 67,00	20,00 63,00
1400	45,00	42,40		1400	25,00 70,00	22,00 65,00
1500	44,70	41,30		1500	40,00 85,00	26,00 68,00
1600	45,60	44,30		1600	52,00 97,00	23,00 68,00
1700	45,00	40,70		1700	59,00 102,00	18,00 63,00
1800	44,60	41,50	N7=15,00	1800	64,00 110,00	10,00 55,00
1900	47,00	44,90	N8=20,00	1900	68,00 113,00	0,00 44,90
1980	41,50	39,70		1980	68,00 108,00	0,00 43,00

Continuación de la rama nº13.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 25: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 26: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1980
Diámetro medio (mm)	46,85
Masa (g)	3062,20
Densidad (kg/m³)	830,61

Tabla 38: propiedades físicas rama 13.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	10
Ultrasonido (µs)	525
Xilohigrómetro (H %)	34,00

Tabla 39: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 13.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Longitud: 1500 mm

Nº probeta: 14

Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	85,00	91,00	F1=45,00 F2=30,00 F3=25,00 N1=15,00	0	0,00 91,00	5,00 87,00
100	86,00	87,00		100	0,00	9,00
200	85,00	83,00	N2=10,00	200	0,00	92,00
300	81,00	83,00	N3=15,00	300	0,00	9,00
400	82,00	81,00	N4=15,00	400	0,00	10,00
500	83,50	80,00		500	83,00	94,00
600	80,00	81,00		600	0,00	3,00
700	77,00	78,00	N5=15,00	700	81,00	87,00
800	81,50	80,00		800	0,00	4,00
900	78,00	77,00		900	80,00	88,00
1000	77,00	76,00	N6=20,00	1000	0,00	0,00
1100	79,00	75,00		1100	82,00	82,00
					0,00	0,00
					77,00	79,00
					0,00	10,00
					76,00	87,00
					0,00	10,00
					75,00	89,00



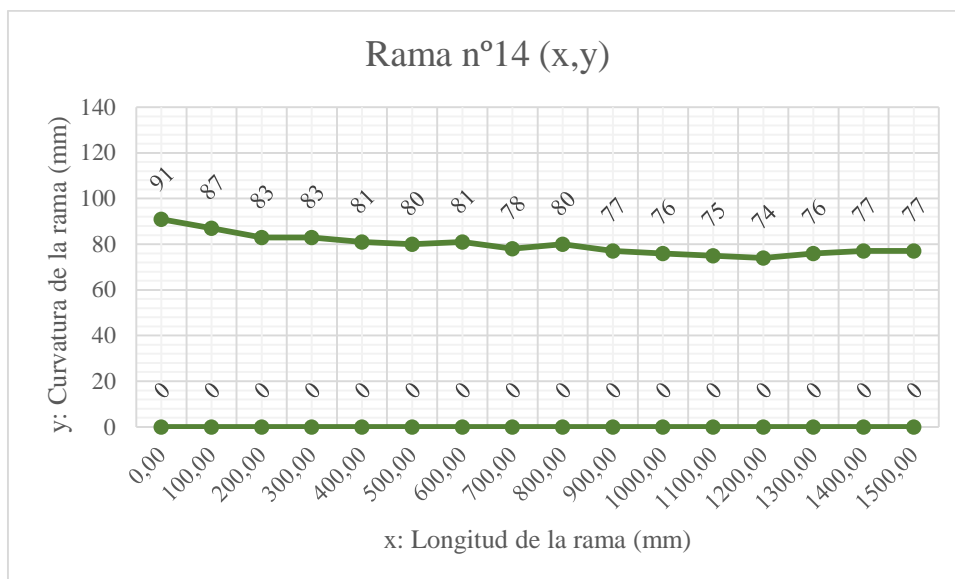
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

1200	78,00	74,00	N7=15,00	1200	0,00	22,00
1300	77,00	76,00	N8=10,00	1300	74,00	100,00
1400	75,00	77,00	N9=10,00	1400	0,00	28,00
1500	78,00	77,00		1500	76,00	105,00
					0,00	34,00
					77,00	111,00
					0,00	46,00
					77,00	122,00

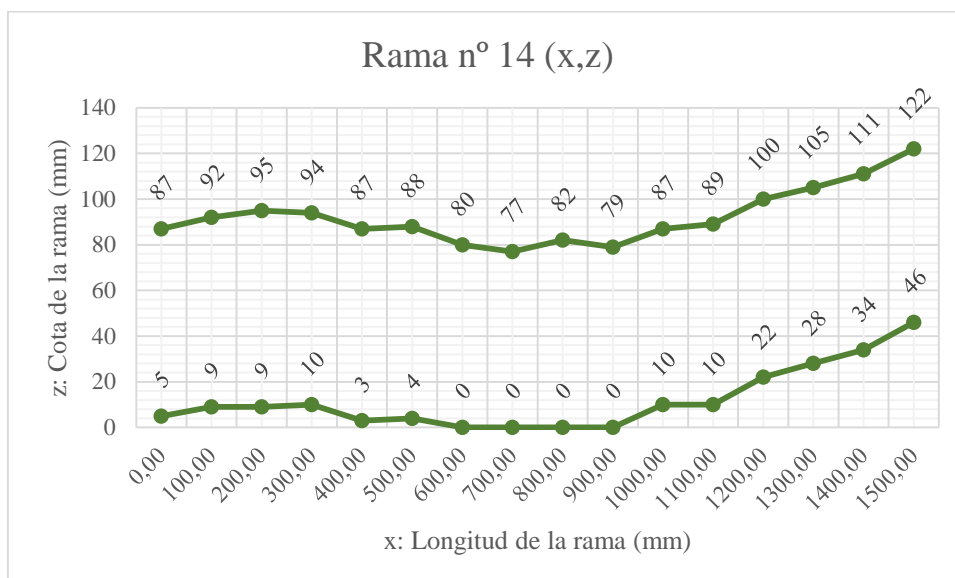
Continuación tabla de la rama nº14.

Nota: aquí el D1 ha de coincidir más o menos con Y, debido a que a la hora de medir Y & Z la posición de la rama favorecía esta correspondencia y no la habitual.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 27: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 28: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1500
Diámetro medio (mm)	77,96
Masa (g)	5805
Densidad (kg/m³)	758,20

Tabla 41: propiedades físicas rama 14.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	11
Ultrasonido (µs)	386
Xilohigrómetro (H %)	57,80

Tabla 42: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 14.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

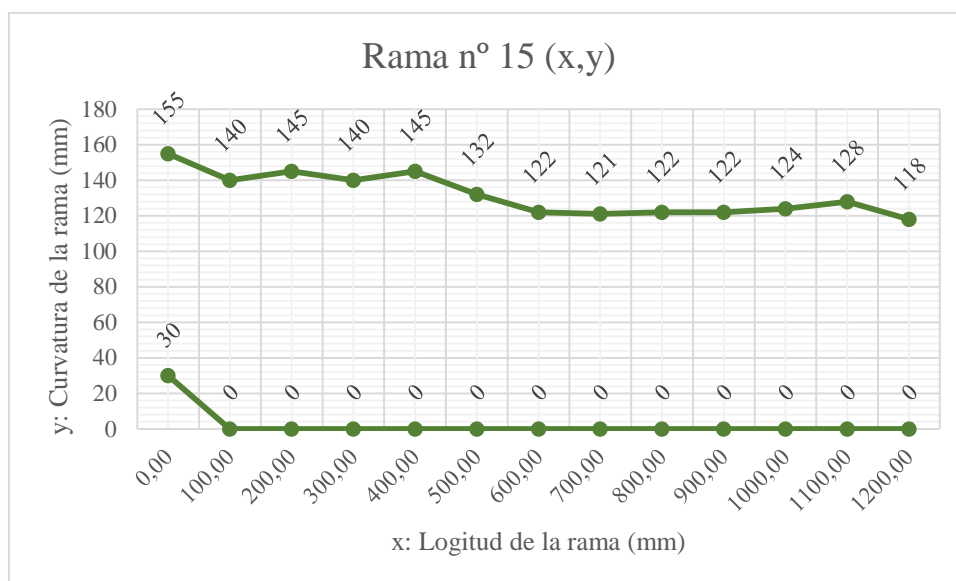
Nº probeta: 15

Longitud: 1190 mm

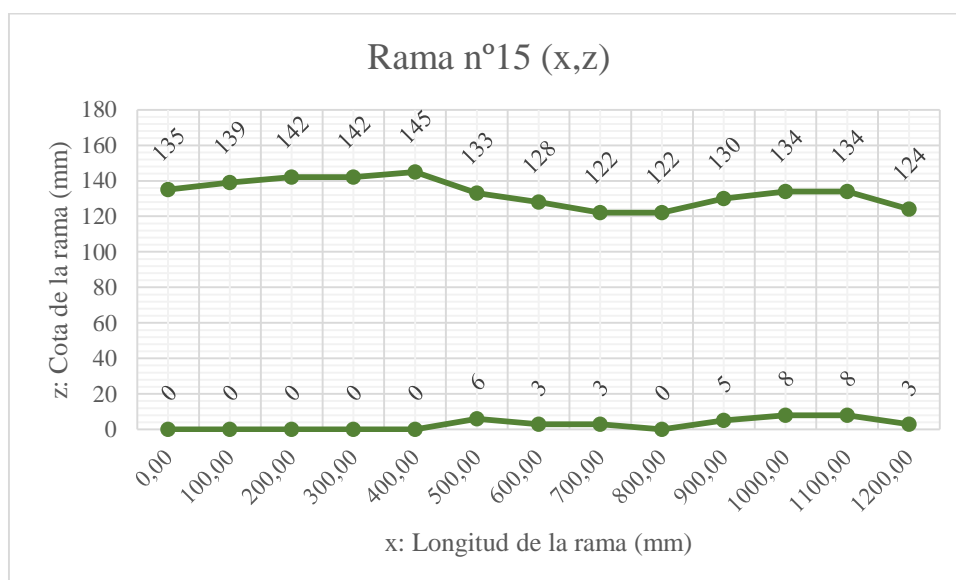
Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	127,00	134,00	F1=20,00 F2=20,00 F3=25,00	0	30,00 155,00	0,00 135,00
100	140,00	137,00	N1=30,00 N2=35,00	100	0,00 140,00	0,00 139,00
200	145,00	140,00	N3=30	200	0,00 145,00	0,00 142,00
300	140,00	140,00	N4=35	300	0,00 140,00	0,00 142,00
400	145,00	143,50	N5=80,00	400	0,00 145,00	0,00 145,00
500	132,00	127,00		500	0,00 132,00	6,00 133,00
600	122,00	121,00		600	0,00 122,00	3,00 128,00
700	121,00	122,00		700	0,00 121,00	3,00 122,00
800	122,00	122,00		800	0,00 122,00	0,00 122,00
900	122,00	123,00	N6=17,00	900	0,00 122,00	5,00 130,00
1000	124,00	121,00	N7=25,00	1000	0,00 124,00	8,00 134,00
1100	128,00	121,00		1100	0,00 128,00	8,00 134,00
1200	118,00	119,00	F4=25,00 F5=17,00 F6=18,00 F7=40,00	1200	0,00 118,00	3,00 124,00

Nota: el Nudo 7 ocupa la sección 40-50 cm

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 29: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 30: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	190
Diámetro medio (mm)	127,09
Masa (g)	13341,00
Densidad (kg/m ³)	830,61

Tabla 44: propiedades físicas rama 15.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	13
Ultrasonido (μs)	276
Xilohigrómetro (H %)	75,2

Tabla 45: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 15



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Nº probeta: 16		Longitud: 1415 mm				
Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	78,26	59,50	F1=22,00 F2=17,00 F3=30,00 F4=22,00	0	0,00	0,00
100	80,30	83,70		100	0,00	5,00
200	81,90	80,70	N1=15,00 N2=35,00	200	81,00	83,00
300	90,20	85,80	N3=25,00 N4=30,00 N5=20,00 N6=35,00	300	14,00	5,00
400	84,50	92,30		400	95,00	84,00
500	81,80	92,50	N7=15,00	500	13,00	5,00
600	80,10	84,10		600	100,00	92,00
700	77,60	76,80		700	3,00	5,00
800	76,90	75,70		800	80,00	85,00
900	71,75	71,80		900	0,00	5,00
1000	71,60	69,40	N8=20,00	1000	79,00	83,00
1100	71,70	73,00		1100	0,00	5,00
					77,00	80,00
					5,00	5,00
					80,00	75,00
					0,00	5,00
					73,00	75,00
					0,00	0,00
					73,00	74,00



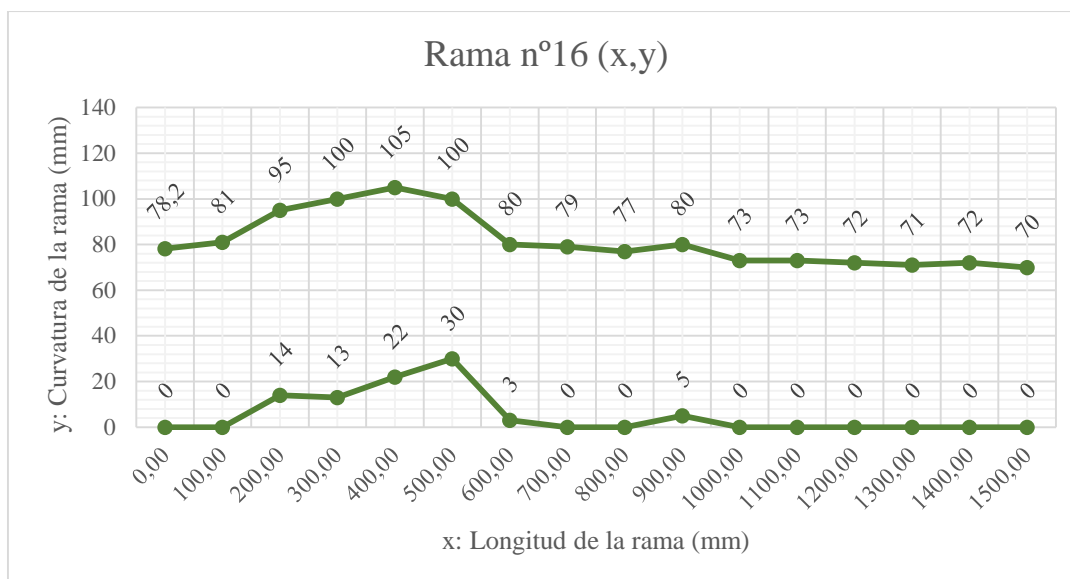
Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

1200	69,80	69,40	N9=10,00	1200	0,00	5,00
1300	69,80	68,40		1300	0,00	10,00
1400	69,50	67,80		1400	0,00	10,00
1415	69,35	69,80	F5=35,00 F6=30,00 F7=35,00 F8=30,00 F9=56,00	1415	0,00	10,00
					70,00	80,00

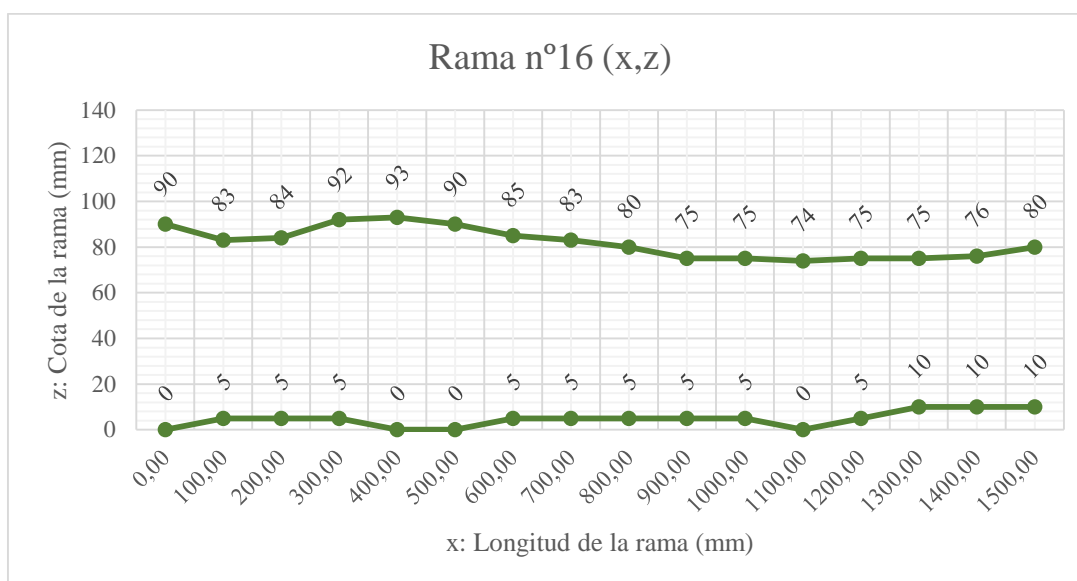
Nota: 37-60cm existe una cicatriz.

Continuación tabla de la rama nº16.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 31: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 32: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1415
Diámetro medio (mm)	69,26
Masa (g)	5364,00
Densidad (kg/m ³)	787,842

Tabla 47: propiedades físicas rama 16.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	10
Ultrasonido (µs)	342
Xilohigrómetro (H %)	50,7

Tabla 48: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 16.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

Nº probeta: 17		Longitud: 1650 mm				
Longitud	D ₁	D ₂	Irregularidades	x	y	z
0	60,80	58,90		0	30,00 90,00	0,00 60,80
100	57,80	60,60	N1=30,00 N2=15,00	100	17,00 75,00	0,00 58,00
200	56,80	59,10		200	0,00 60,00	14,00 74,00
300	57,80	57,30	N3=15,00	300	0,00 59,00	23,00 82,00
400	62,20	58,70	N4=15,00	400	0,00 60,00	17,00 79,00
500	61,80	64,60	N5=15,00	500	0,00 66,00	27,00 87,00
600	55,80	55,35	N6=25,00	600	0,00 56,00	28,00 87,00
700	54,35	55,35		700	8,00 60,00	36,00 92,00
800	56,70	58,40	N7=15,00	800	7,00 65,00	40,00 95,00
900	52,62	52,00	N8=20,00	900	10,00 60,00	36,00 88,00
1000	70,80	52,30	N9=25,00	1000	0,00 54,00	48,00 98,00
1100	53,10	51,40		1100	8,00 60,00	63,00 105,00

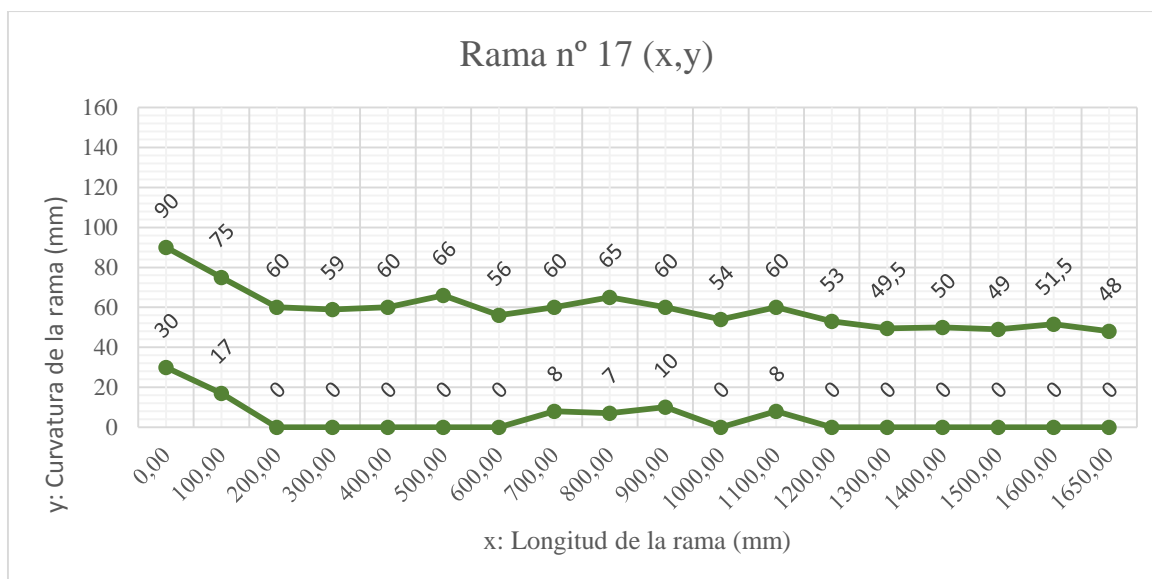


Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

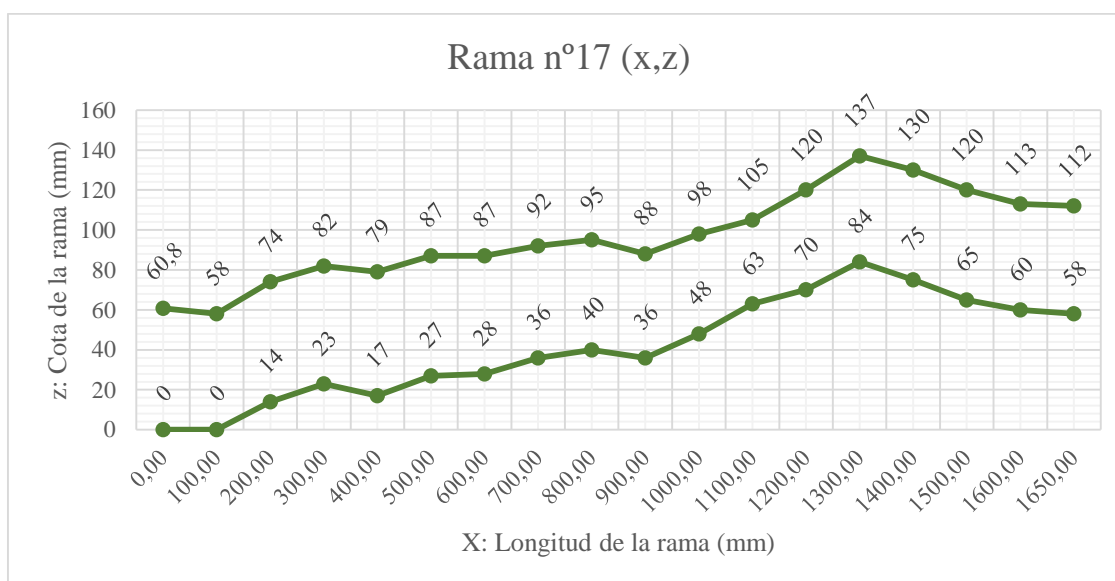
1200	51,50	51,20	N10=20,00	1200	0,00	70,00
1300	50,80	48,70		1300	0,00	84,00
1400	53,30	48,50		1400	0,00	75,00
1500	51,50	48,40		1500	0,00	65,00
1600	50,40	49,30		1600	0,00	60,00
1650	47,70	47,60		1650	0,00	58,00
					48,00	112,00

Nota: en la sección 1000 mm, la coordenada z se ha contado la rama, si no se contase la rama z = 15,00(mm)

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Gráfica 33: Curvatura de la rama vista desde planta.



Gráfica 34: Curvatura de la rama vista perfil.

Propiedades físicas	
Longitud de la rama (mm)	1650
Diámetro medio (mm)	53,09
Masa (g)	3011,00
Densidad (kg/m ³)	765,44

Tabla 50: propiedades físicas rama 17.

Ensayos no destructivos	
Pilodyn (mm)	12
Ultrasonido (μs)	456
Xilohigrómetro (H %)	66

Tabla 51: Resultado de los ensayos no destructivos en la rama 16.



Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

13. ANEXO VI: IMÁGENES FOTOGRÁFICAS.



Rotura rama 1 en toda la franja de $M_{m\acute{a}x}$.



Rotura rama 2 por la parte inferior de la rama, a 6,25 cm del centro longitudinal de la rama.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Rotura rama 3 por debajo de la carga izquierda.



Rotura de la rama 5 por debajo de la carga derecha, al lado de un nudo.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Rotura de la sección completa de la rama 7.

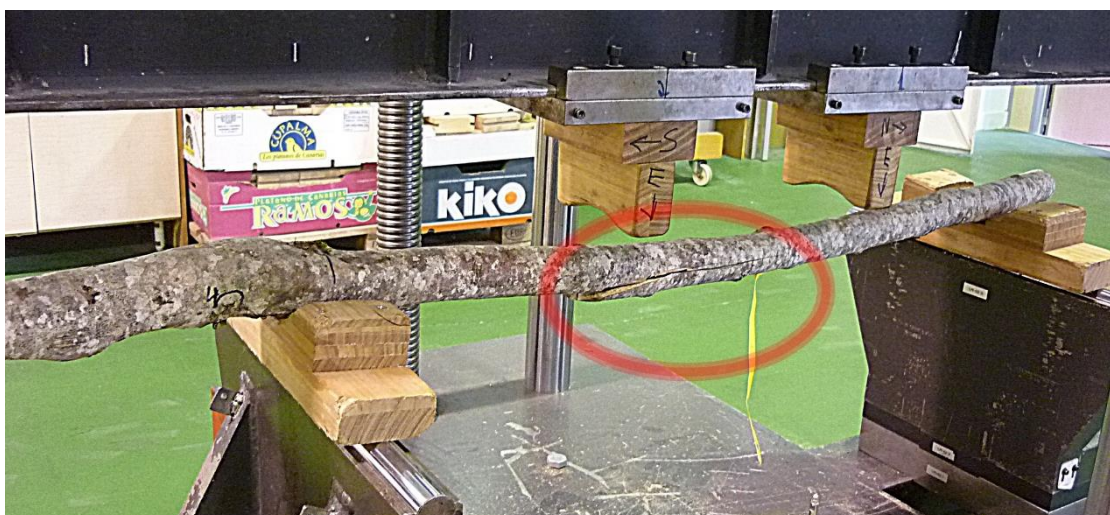


Rotura rama 8. (línea roja indica el centro longitudinal de la rama).

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.

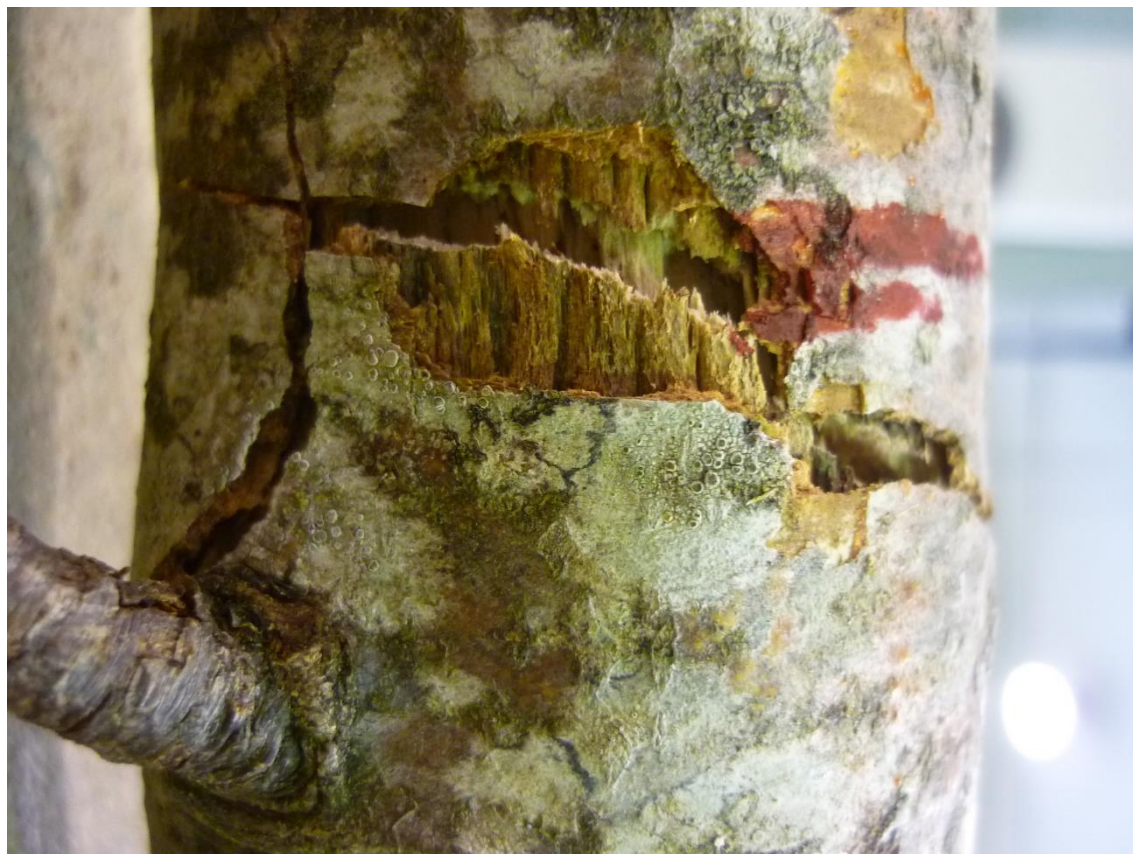


Rotura rama 10 en la zona de M_{\max} y cortante nulo.



Rotura rama 13.

Determinación de las propiedades físicas-mecánicas de ramas en verde de haya (*Fagus sylvatica* L.) procedentes del Hayedo de Montejo de la Sierra de Madrid.



Rotura de la rama 17 por debajo a 70 cm de la testa izquierda, casi en el centro.